



Uplatnění metody konečných prvků v konstrukci kompresních oděvů

Diplomová práce

Studijní program: N3106 – Textilní inženýrství
Studijní obor: 3106T017 – Oděvní a textilní technologie
Autor práce: **Bc. Michaela Mencáková**
Vedoucí práce: Ing. Blažena Musilová, Ph.D.





Diploma thesis

Study programme: N3106 – Textile Engineering
Study branch: 3106T017 – Clothing and Textile Engineering
Author: **Bc. Michaela Mencáková**
Supervisor: Ing. Blažena Musilová, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michaela Mencáková**
Osobní číslo: **T14000021**
Studijní program: **N3106 Textilní inženýrství**
Studijní obor: **Oděvní a textilní technologie**
Název tématu: **Uplatnění metody konečných prvků v konstrukci kompresních oděvů**
Zadávací katedra: **Katedra oděvnictví**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte rešerši zaměřenou na identifikaci mechanických parametrů pleteniny v souvislosti se žádanými svěrnými účinky sportovní podkolenky na dolní končetinu lidského těla.
2. Na základě poznatků získaných v rešerši navrhnete vhodné provedení zkoušky pro určení požadovaných parametrů textilního kontinua, zejména míry deformace ve více směrech, a tuto zkoušku realizujte.
3. Vytvořte vhodný materiálový model a ověřte jej.
4. Zrealizujte experiment popisující svěrné účinky na jednoduché geometrii a pokuste se vytvořit konečně prvkový model.
5. Výsledky vyhodnoťte a diskutujte z hlediska praktického využití v parametrické konstrukci sportovních podkolenek.

Rozsah grafických prací: **dle rozsahu dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- Stříž, B., Mechanika textilií. Část 1: Základy mechaniky kontinua. TUL Liberec 2001.
- Stříž, B., Mechanika textilií. Část 2: Aplikace mechaniky kontinua. TUL Liberec 2001.
- Shishoo, R., Textiles in sport, Woodhead Publishing, Cambridge England 2005, ISBN-13: 978-1845695392.
- Filatov, V, N., Navrhování pružných textilních výrobků, SNTL 1984)
- RAL GZ 387-1, Medical Compression Hosiery - Quality Assurance, Published 2008,: Supersedes RAL GZ 387.
- Kolář,V. Kratochvíl,J. Leitner,F. Ženíšek,A., Výpočet plošných a prostorových konstrukcí metodou konečných prvků, SNTL Praha 1979.
- Veit, D., Simulation in Textile Technology: Theory and Applications, RWTH Aachen University, Germany 2012. ISBN: 978-0-85709-029-4.
- Volino, P et al: Virtual Clothing: Theory and Practice, Springer-Verlag Heidelberg New York, ISBN 3-540-67600-7.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Blažena Musilová, Ph.D.**

Katedra oděvnictví

Konzultant diplomové práce: **Ing. Ondřej Novák, Ph.D.**

Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Ostatní konzultanti: **Ing. Josef Vosáhlo**


Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání diplomové práce: **11. listopadu 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2016**


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka




doc. Ing. Antonín Havelka, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 11. listopadu 2015

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych ráda poděkovala panu Ing. Josefu Vosáhlovi z Katedry netkaných textilií Technické univerzity v Liberci za časté konzultace, odborné vedení práce, trpělivost, cenné připomínky a rady a také panu Ing. Ondřejovi Novákovi, Ph.D. z Katedry netkaných textilií Technické univerzity v Liberci za cenné připomínky a rady. Dále bych chtěla poděkovat vedoucí této diplomové práce paní Ing. Blaženě Musilové, Ph.D. z Katedry oděvnictví Technické univerzity v Liberci za cenné připomínky a konzultace.

Další poděkování patří mé rodině za trpělivost a podporu během studia.

ANOTACE

Cílem práce je zjistit, jakým tlakem působí na lidské tělo sportovní kompresní podkolenky. Rešeršní část práce je zaměřena na mechanické vlastnosti pletenin, princip metody konečných prvků, způsoby měření komprese a využití komprese v konstrukci oděvu. Experimentální část práce se zabývá stanovením mechanických vlastností textilie používané pro výrobu sportovních kompresních podkolenek. Součástí experimentu je tvorba simulačního modelu a ověření jeho výsledku na přístroji PicoPress.

KLÍČOVÁ SLOVA

Deformace, komprese, sportovní kompresní podkolenky, kontinuum, metoda konečných prvků (MKP), simulace

ANNOTATION

The aim of this thesis is to find out how much pressure sports compression socks make to the human body. The recherche part is devoted to the mechanical qualities of knitted materials, principle of Finite element method, compression measurements method and the use of compression in clothing construction. The experimental part of this thesis focuses on the examination of mechanical qualities of material the sports compression socks are made of. One part of the experiment is the creation of a simulation model and verifying the result in PicoPress.

KEY WORDS

Deformation, compression, sports compression socks, continuum, Finite element method (FEM), simulation

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	8
ÚVOD	11
1 PLETENINY	12
1.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI PLETENIN	14
1.1.1 PEVNOST	15
1.1.2 TAŽNOST	16
1.1.3 PRUŽNOST	19
2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (Finite element method – FEM)	20
2.1 HISTORIE A SOUČASNOST	20
2.2 PRINCIP METODY	21
2.3 PROGRAM ANSYS WORKBENCH	23
2.4 MODEL Y ELASTICKÝCH MATERIÁLŮ	24
2.4.1 LINEÁRNÍ ELASTICKÝ IZOTROPNÍ MODEL	25
2.4.2 LINEÁRNÍ ELASTICKÝ ORTOTROPNÍ MODEL	25
2.4.3 NEO-HOOKŮV MODEL	26
2.4.4 ARRUDA-BOYCEŮV MODEL	26
2.4.5 OGDENŮV MODEL	26
2.4.6 MOONEY-RIVLINŮV MODEL	26
2.5 TVORBA MODELU	27
3 KOMPRESNÍ TERAPIE	28
3.1 MĚŘENÍ KOMPRESNÍ TERAPIE	33
4 VYUŽITÍ KOMPRESNÍ TERAPIE V KONSTRUKCI ODĚVŮ	37
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	42
5.1 POSTUP EXPERIMENTU	42
5.1.1 STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM	42

5.2	POPIS MATERIÁLU	44
5.3	POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ.....	44
5.4	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	45
5.4.1	MĚŘENÍ PLOŠNÉ HMOTNOSTI	45
5.4.2	MĚŘENÍ TLOUŠŤKY MATERIÁLU	45
5.4.3	VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V PODÉLNÉM SMĚRU.....	46
5.4.4	VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V PŘÍČNÉM SMĚRU.....	48
5.4.5	VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V DIAGONÁLNÍM SMĚRU	50
6	SIMULACE	56
6.1	DEFINOVÁNÍ MATERIÁLU	56
6.2	SIMULACE STATICKÉ ZKOUŠKY TAHEM	57
6.3	SIMULACE SVĚRNÝCH ÚČINKŮ KOMPRESNÍ PODKOLENKY ..	60
6.4	OVĚŘENÍ VÝSLEDKU SIMULACE.....	63
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ	64
	ZÁVĚR	66
	LITERATURA	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	70
	SEZNAM TABULEK	71
	SEZNAM GRAFŮ	71
	SEZNAM PŘÍLOH.....	72
	PŘÍLOHY	73

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

apod.	a podobně
atd.	a tak dále
b	plocha protaženého vzorku
δ	tažnost (prodloužení)
D_{ijkl}	symetrický tenzor materiálových elastických koeficientů
d	délka vzorku
D	dolní přímka
do	délka oděvu
dz	délka zad
ε	relativní deformace
ε^T	přetvoření
E	modul pružnosti v tahu
F	síla
FEM	Finite element method
F_n	průměrná pevnost nitě
F_p	pevnost pleteniny
G	modul pružnosti ve smyku
g	gram
Hx	hustota řádků nebo sloupků
h	tloušťka materiálu
H	hrudní přímka
IS	interval spolehlivosti
K	krční přímka

Michaela Mencáková

Ko	kolenní přímka
K _{vp}	koeficient využití pevnosti
K _{vz}	koeficient vazby
λ	protažení
L	lopatková přímka
Lt	lýtková přímka
l	délka vzorku při přetrhu
l _o	původní (upínací) délka vzorku
μ	Poissonovo číslo
m	hmotnost
mmHg	milimetry rtuťového sloupce
MKP	Metoda konečných prvků
N	nadpažková přímka
např.	například
o^T	objemové zatížení
oh	obvod hrudníku
ok	obvod krku
oz	obvod zápěstí
π	Ludolfovo číslo
P	potenciál vnějšího zatížení
P	pasová přímka
p^T	plošné zatížení
ρ_s	plošná hmotnost
ρ_v	objemová hmotnost materiálu

r	původní plocha vzorku
σ	napětí
σ^T	napětí
R	rozkroková přímka
S	plocha
S	průřez materiálu
S	sedová přímka
šz	šířka zad
t	tloušťka textilie
tj.	to je
tzn.	to znamená
tzv.	takzvaně
u^T	posuv
vp	výška postavy
W	energie napjatosti tělesa Ω
Zhp	zadní hloubka podpaží

ÚVOD

Již několik desetiletí známe přínosy zdravotních kompresních podkolenek pro lidské tělo. V posledních letech se rozšířila výroba sportovních kompresních podkolenek, které mají pozitivní vliv na výkonnost, vytrvalost i rychlost regenerace po výkonu u sportovců. Oba druhy těchto podkolenek působí na dolní končetiny lidského těla v oblasti kotníků stoprocentním tlakem, který se směrem ke kolenům snižuje, aby docházelo ke správné cirkulaci krve. Je důležité tento tlak sledovat a při výběru podkolenek dbát na doporučení lékaře. Je možné si vybrat z pěti kompresních tříd od velmi slabé až po velmi silnou.

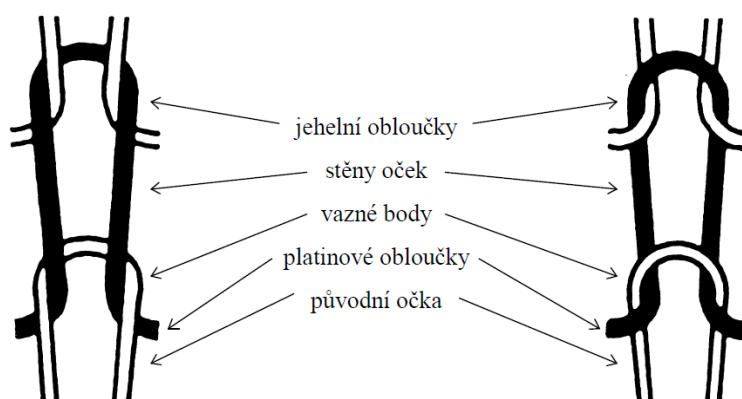
V některých případech, kdy není možné provést přímé měření, lze využít simulace. Ta může být použita pro získání cenných informací, které nelze získat jinou cestou. Užití simulace je z ekonomického hlediska často velmi výhodné.

Rešeršní část je významnou částí diplomové práce a je rozdělena do několika oblastí, které je důležité znát pro správné vytvoření experimentu. První část práce je zaměřena na pleteniny, především na jejich mechanické vlastnosti. V druhé části rešerše je popsána historie a základní princip metody konečných prvků a program ANSYS Workbench využívající tuto metodu. Jsou zde popsány nejpoužívanější materiálové modely, které popisují chování nelineárních materiálů. Dále je popsán obecný postup pro tvorbu simulace. Třetí část rešerše je zaměřena na průzkum týkající se kompresní terapie, přínosu, který má pro lidské tělo, i negativních účinků. Je zde popsán rozdíl mezi zdravotními a sportovními kompresními podkolenkami. Dále jsou zde popsány vybrané přístroje pro měření komprese. Závěr rešeršní části je věnován využití komprese v konstrukci oděvů.

Experimentální část práce se zabývá zjištěním mechanických vlastností materiálu, z něhož jsou vyrobeny kompresní sportovní podkolenky. Dále je pomocí simulace zjišťován tlak, jakým působí sportovní kompresní podkolenka na komolý kužel, který simuluje tvar dolní končetiny lidského těla.

1 PLETENINY

Pletenina je plošná textilie vznikající vytvářením a proplétáním oček. Pleteninu je možné tvořit jednou nebo více soustavami nití, které jsou vzájemně provázány. Základním stavebním prvkem pletenin je očko, které je znázorněno na obr 1. Očko je rozděleno na několik částí: jehelní oblouček, platinové obloučky a stěny očka. V pletenině rozeznáváme dva druhy oček, a to lící a rubní očko. Lící očko je protaženo předchozím očkem zezadu dopředu, rubní očko je protaženo předcházejícím očkem zepředu dozadu, tedy v opačném směru. [1], [3]



Obr. 1: Lící očko, rubní očko [3]

Důležitým parametrem pleteniny je hustota řádků a sloupků. Udává se jako počet oček v řádcích a sloupcích na 10 cm. Hustota vyjadřuje velikost oček, čím je tedy hustota vyšší, tím je očko menší a naopak. Hustota celková, která je vyjádřena jako součin hustoty řádku a hustoty sloupku v m^2 , udává počet oček v ploše o velikosti 1 m^2 . [1]

Způsob provázání oček mezi sebou se nazývá vazba pleteniny. Rozlišujeme dvě základní vazby pletenin a to zátažné a osnovní. Zátažné pleteniny se vytvářejí z vodorovné soustavy nití, po řádcích, tento typ pleteniny je snadno paratelný. Zátažná pletenina se vyrábí ručně na jehlicích nebo strojově na zátažných pletařských strojích. Osnovní pleteniny se vytvářejí ze svislé soustavy nití, očka se vytvářejí v podélném směru po sloupcích, plete se tedy celý řádek najednou. Každé očko v řádku pleteniny je vytvořeno ze samostatné nitě. Tato pletenina je obtížněji paratelná. Osnovní pleteniny se vyrábějí na osnovních pletařských strojích. [1]

Dále lze rozdělit pleteniny podle vzhledu líce a rubu a to na jednolící, oboulící a obourubní. Jednolící pletenina obsahuje na lící straně jen lící očka a na rubní straně jen rubní očka. Oboulící pleteniny mají vzhled z obou stran stejný, protože obsahují lící i rubní sloupky. Dalším typem jsou pleteniny obourubní, které mají z obou stran vzhled rubní strany, tento typ obsahuje ve sloupku lící i rubní očka. Osnovní pleteniny se nejčastěji vyrábějí jako jednolící. Dále se mohou pleteniny dělit na hladké a vzorované. Vzor pleteniny tvoří plastický nebo barevný efekt, kterého je dosaženo vazbou. Plastické efekty jsou vytvořeny střídáním rubních a lících oček v řádcích a sloupcích a použitím složitějších vazebních prvků. Barevného efektu je dosaženo střídáním různobarevných nití v řádcích nebo sloupcích. [1]

Pletařské stroje se dělí podle základní vazby na pletací stroje a osnovní stávky. Dle tvaru jehelních lůžek se dělí na ploché a okrouhlé. Ploché stroje mají jehelní lůžko ve tvaru desky, jehly jsou uloženy v rovině vedle sebe. Na těchto strojích se vyrábí pletenina jako plochý kus v plné šíři. U okrouhlých pletacích strojů jsou lůžka válcová a jehly jsou uloženy po obvodu válce. Výsledkem je pletenina ve tvaru hadice. Průměry válcových lůžek mohou být různé: od malopřůměrových, které se používají pro punčochové výrobky, až po velkopřůměrové. Dále můžeme pletací stroje dělit podle počtu jehelních lůžek, a to na jednolůžkové a dvoulůžkové. Jednolůžkové stroje jsou určeny pro výrobu jednolících pletenin, dvoulůžkové jsou určeny pro výrobu pletenin oboulících a obourubních. Osnovní stávky jsou ploché stroje s jedním lůžkem. [1], [3]

Vlastnosti pletenin jsou dány především jejich strukturou a materiálem. Struktura pleteniny je dána převážně vazbou, dále také šířkou a výškou očka, délkou nitě v očku, tloušťkou, tzn. průměrem nitě, hustotou sloupků a řádků. Charakteristickým znakem pletenin jsou velikost a tvar oček. K nejvýznamnějším vlastnostem zátažných pletenin patří tažnost, pružnost, mačkavost, splývavost, zátrhavost, paratelnost, prodyšnost a tepelně izolační schopnost. [1]

Užitné vlastnosti pletenin se uplatňují při jejich používání. Rozděluje je do několika skupin: trvanlivost, estetické a fyziologické vlastnosti.

Trvanlivostí rozumíme odolnost vůči poškození a opotřebení. Textilie jsou během používání natahovány, ohýbány, odírány, působí na ně světlo, teplo a pot atd. Trvanlivost je určována dalšími vlastnostmi textilií, mezi které patří paratelnost a především pevnost

v tahu a tažnost, které jsou podrobně popsány dále. Paratelnost je chápána jako samovolné uvolňování oček z pleteniny. U zátažných pletenin je paratelnost snazší než u osnovních. Paratelnost je způsobena nejčastěji přetrhem nitě. [4]

Estetickými vlastnostmi se rozumí především takové, které ovlivňují vzhled textilií, tedy mačkavost, splývavost a zátrhavost. Mačkavost může nepříznivě ovlivňovat vzhled pleteniny, nejvíce je ovlivněna materiálovým složením pletenin. Splývavost je schopnost textilie vytvářet estetické záhyby při zavěšení v prostoru. Zátrhavost vzniká při styku pleteniny s ostrými nebo nerovnými povrchy, kdy dojde k povytažení oka z vazby pleteniny. [4]

Fyziologické vlastnosti jsou důležité pro komfortní užívání oděvu. Jsou to především prodyšnost, savost a tepelná izolace. Prodyšnost je schopnost pleteniny propouštět vzduch a vodní páry. Je nejvíce ovlivněna materiálem, vazbou a hustotou pleteniny a má vysoký význam ze zdravotního hlediska. Savost je schopnost textilie vázat do své struktury kapaliny. Tepelná izolace je schopnost pleteniny zamezit průchodu tepla z teplejšího prostředí do chladnějšího a naopak. Je ovlivněna především množstvím uzavřeného vzduchu v pletenině, vazbou, materiálem a hustotou tkaniny. Čím větší je tepelná izolace, tím menší je prodyšnost. [4]

1.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI PLETENIN

V této kapitole jsou popsány významné mechanické vlastnosti pletenin, kterými jsou pevnost v tahu, tažnost a pružnost. Všechny tyto vlastnosti spolu úzce souvisí.

Všeobecně jsou mechanické vlastnosti materiálů jejich odezvou na mechanické působení vnějších sil. Podle působení vnějších sil se rozlišuje namáhání na tah, na tlak, na ohyb, na krut. Tyto druhy namáhání se většinou vyskytují v kombinaci. V laboratoři se tato namáhání zkoumají odděleně od sebe, ale normovány jsou pouze zkoušky pevnosti v tahu. [7]

1.1.1 PEVNOST

Pevnost je vyjádřena jako síla potřebná k přetrhu vzorku. Pro pleteniny nemá zásadní význam, protože u pletenin vyrobených pro oděvní účely nedochází k takovému namáhání, které by způsobilo porušení pleteniny. Proto má pevnost pletenin význam převážně u pletenin pro technické účely. [6]

Dle směru namáhání lze rozlišovat pevnost plošnou (v průtlaku), kdy je pletenina namáhána všemi směry, a pevnost směrovou, kdy je namáhána ve směru sloupků nebo řádků.

Pevnost v průtlaku napodobuje vyboulení pleteniny v oblasti kolene nebo lokte. Vyboulení je ve tvaru kulového vrchlíku o poloměru koule R . [6]

Směrovou pevnost pleteniny lze dle Kováře ([2], s. 33) přibližně vypočítat dle následujícího vztahu:

$$F_p = H_x \cdot F_n \cdot K_{vz} \cdot K_{vp} , \quad (1)$$

kde F_p – pevnost pleteniny

H_x – hustota řádků nebo sloupků, záleží na směru namáhání pleteniny

F_n – průměrná pevnost nitě

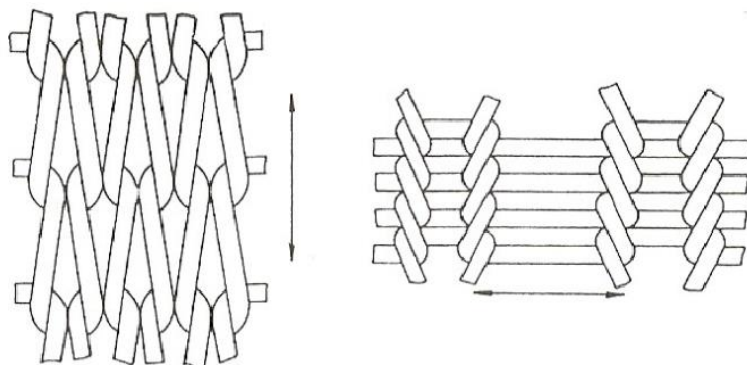
K_{vz} – koeficient vazby

K_{vp} – koeficient využití pevnosti

Koeficient vazby K_{vz} udává počet nití, přenášejících zatížení na jednotku hustoty. Např. u zátažné jedlící hladké pleteniny při namáhání ve směru sloupků je $K_{vzs} = 2$, protože v jednom sloupku sílu přenášejí dvě stěny očka. Pro namáhání v příčném směru, tedy ve směru řádků, bude $K_{vzr} = 1$. Koeficient využití pevnosti K_{vp} je u pletenin menší než jedna, kolem 0,5, protože plně využít pevnost všech nití není možné vzhledem k nestejnomyšlosti nitě, protože dojde k přetrhu nejslabšího místa. [2]

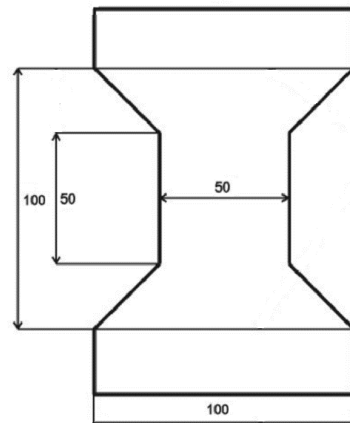
1.1.2 TAŽNOST

Tažností rozumíme schopnost textilie měnit svůj tvar vlivem vnějších sil. Je to nejtypičtější vlastnost pletenin, která zaručuje přizpůsobivost pohybům nositele. Tažnost pletenin je dána tvarem oka a způsobem provázání, tedy vazbou pleteniny. Je částečně ovlivněna i hustotou oček, řidší pletenina má vyšší tažnost. Při natahování pleteniny dochází k deformaci oček. Deformace oček jednolící hladké pleteniny je znázorněna na obr. 2. Pletenina je často napínána ve dvou směrech, tj. biaxiálně. Při natažení ve směru sloupku dojde k prodloužení stěn oček a zmenšení jehelních i platinových obloučků, celkově dojde k zúžení pleteniny ve směru řádku. Při natažení pleteniny ve směru řádku dojde ke zkrácení oček, čímž dochází ke zkrácení pleteniny ve směru sloupku. [1], [2]



Obr. 2: Deformace oček při tahovém namáhání pleteniny [1]

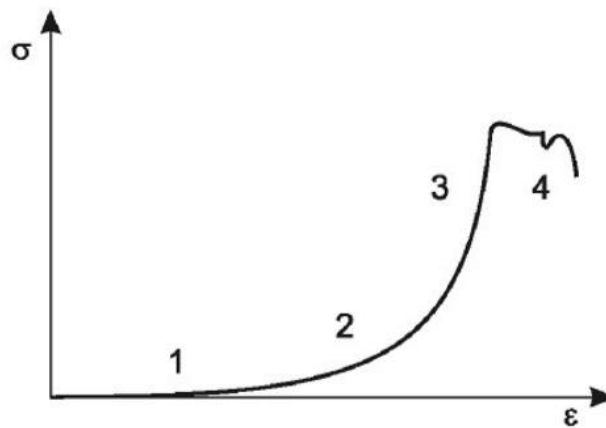
Tažnost může být velká, řádově několik set procent. Příliš velká tažnost brání použití pleteniny na výrobky, kde je požadována určitá tuhost materiálu nebo zachování tvaru. Tažnost ve směru sloupku a řádku je často velmi rozdílná. Zjišťování pevnosti a tažnosti pletenin je řízeno normou ČSN 80 0810 – Zjišťování tržné síly a tažnosti pletenin, která nabyla účinnosti 1. 8. 1984. Její platnost byla ukončena bez náhrady 1. 6. 2008. Vzorek pleteniny je vystřižen dle šablony daných rozměrů a tvaru, viz obr. 3. Podstata zkoušky spočívá v plynulém zatěžování vzorku až do jeho porušení. Vzorek se do čelistí upíná ve stočeném stavu bez předpětí ve vzdálenosti 100 mm, zkouška se provádí do přetrhu. Pevnost se vztahuje na užší část vzorku (50 mm). U čelistí je rozšířen tak, aby nedocházelo k trhání pletenin v čelistech, kde vlivem velké příčné kontrakce pleteniny, tj. zúžení ve směru kolmém na směr působícího napětí, dochází k hromadění napětí. [2], [5], [6]



Obr. 3: Vzorek pro zjišťování tažnosti v milimetrech

Obecně lze textilii zatěžovat v polovině cyklu, tj. do přetrhu, v celém cyklu, při němž nedochází k porušení pleteniny a při následném odlehčení je možné sledovat schopnost zotavení, a ve více cyklech, jejichž cílem je zjistit únavu textilie. [2]

Deformačními vlastnostmi pletenin jsou pevnost a tažnost, které spolu velice úzce souvisí. Jejich měření probíhá většinou společně a výsledkem tohoto měření je deformační křivka pleteniny, která vyjadřuje závislost napětí σ na deformaci ϵ (prodloužení) pleteniny a je znázorněná na obr. 4. [2]



Obr. 4: Deformační křivka pleteniny [2]

V první části křivky, která je označena číslem 1, dochází k velké deformaci pleteniny za působení malého napětí. V tuto chvíli se nitě ve vazných bodech po sobě posouvají a dochází ke změně geometrie osy nitě. V další části křivky, označené číslem 2, křivka

strmě roste, ve vzorku dochází k deformaci průřezu samotných nití a kontaktu sousedních vazných bodů. V části označené číslem 3 dochází k deformaci (tažnosti) nitě a to za působení vysokého napětí. V poslední části křivky, označené číslem 4, dochází k přetrhu vzorku. [2]

Dle Kočího ([6], s. 25) je tažnost dána prodloužením vzorku, které zjistíme při přetrhu. Je dána vztahem (2), je vyjádřena procentuálně

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100, \quad (2)$$

kde ε – tažnost (deformace) [%]
 l – délka vzorku při přetrhu [mm]
 l_0 – původní (upínací) délka vzorku [mm]

Tato tažnost se zjišťuje na dynamometru současně s pevností pleteniny. Po dosažení hodnot upínací délky a délky vzorku při přetrhu získané z dynamometru získáme procentuální hodnotu prodloužení pleteniny. [6]

Stejně jako u zkoušení pevnosti lze rozdělit tažnost na směrovou a plošnou. Tažnost směrová je popsána výše a podrobněji, neboť je pro experiment zásadní.

Plošná tažnost se dle Kočího ([6], s. 26) zjišťuje při zkoušce pevnosti v průtlaku. Je definována vztahem (3), tedy je platná pouze za předpokladu, že vyboulení bude mít tvar kulového vrchlíku, kde tažnost δ je prodloužení kterékoli části vzorku v okamžiku jeho protažení. Je vyjádřena v procentech. V podstatě se jedná o vyjádření směrové tažnosti při plošném namáhání

$$\delta = \frac{b-r}{r} \cdot 100, \quad (3)$$

kde δ – tažnost (prodloužení) [%]
 b – plocha protaženého vzorku [mm²]
 r – původní plocha vzorku [mm²]

Dle Kočího ([6], s. 27-29) ale není tento vztah přesný, protože uvažuje maximální mez pevnosti pleteniny a té není v běžné praxi dosaženo. Lze tedy pro měření tažnosti použít obdélníkový vzorek široký 50 mm s upínací délkou 200 mm. Dalším aspektem je

čas, neboť deformace je na čase závislá. Změnu rozměru v závislosti na čase nazýváme retardací. Posledním aspektem je cykličnost. Experimenty bylo zjištěno, že protažení vzorku pleteniny je rozdílné, probíhá-li v polovičním, celém nebo ve více cyklech.

1.1.3 PRUŽNOST

Pružnost je schopnost pleteniny vrátit se do původního stavu, přestanou-li na ni působit deformační síly. Již z této definice vyplývá, že podmínkou projevu pružnosti musí být její předcházející deformace (protahování). V praxi často dochází k záměně pojmu tažnost a pružnost, což není správné. Pružnost je vždy v maximální míře výhodná u každé textilie, zvláště u těch, které mají vyšší tažnost, jako je pletenina. Pokud by pletenina nebyla pružná, byla by nevhodná pro oděvní výrobky, neboť každé její vyboulení by mělo trvalý charakter. Jinými slovy lze pružnost vyjádřit jako schopnost pleteniny přizpůsobit se tvaru lidského těla. Pružnost závisí převážně na vazbě pleteniny a použitém materiálu. Je významná především při výrobě sportovního oblečení a prádla. [1], [6]

Konkrétní vyjádření pružnosti u nás není normováno, proto si jednotlivé instituce vytvářejí vlastní koncepce podle účelu a možností použití. Dle Kočího ([6], s. 29-31) lze pružnost sledovat ve třech závislostech. První je závislost na zatížení, neboť pružnost je podmíněna zatížením a odlehčením, tedy celým cyklem. Druhou je závislost deformace na čase, kterou je možné po provedení zkoušky v celém cyklu rozdělit na tři části:

- 1) deformaci pružnou, která skončí okamžitě s odlehčením,
- 2) deformaci časovou, která se projevuje v závislosti na čase a po odlehčení je možné pozorovat relaxaci pleteniny,
- 3) deformaci trvalou, která po uvolnění zůstává a projevuje se znehodnocením pleteniny.

Třetí závislostí je závislost na zatěžovacích cyklech. Experimenty je potvrzeno, že cyklickým namáháním ztrácí pletenina svoji pružnost, „unaví se“ a tím je znehodnocena.

2 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (Finite element method – FEM)

Metoda konečných prvků (dále jen MKP) je numerická metoda pro řešení rozsáhlé třídy inženýrských problémů.

2.1 HISTORIE A SOUČASNOST

Metoda vznikla zhruba v polovině 50. let minulého století, její další rozvoj je spojen s rozvojem výpočetní techniky. Vznikla pro potřeby výpočtů konstrukcí v leteckém (Boeing), kosmickém (Apollo), jaderném a vojenském průmyslu (ponorky, rakety), odtud se rozšířila do akademického prostředí a do průmyslové praxe. Základy MKP jsou spojeny např. se jmény Clough, Turner, Martin a mnoha dalších. První knihu o MKP napsali Zienkiewicz a Cheung. Inženýři používali metodu dříve, než vznikla její korektní matematická formulace. Matematici si zpočátku neuvědomovali široké možnosti praktického využití této metody. Ke korektní matematické formulaci přispělo koncem 60. let i VUT (Zlámal, Ženíšek, Kolář a další). Mezi lety 1968 – 1988 se u nás metoda rozvinula a pronikla do výuky i praxe původními učebnicemi a skripty s ukázkami praktických aplikací věnovanými matematické a programovací stránce. Během vývoje v letech 1956 – 1997 se metodou začali zabývat matematici a položili její matematické základy bez uvažování fyzikální podstaty řešené úlohy. [9], [10]

Podstata metody vychází z Ritzovy metody, publikované roku 1909 Walthrem Ritzem, která k řešení problému využívá Cauchyho koncepci, podle které lze posloupnost reálných čísel aproximovat limitou s určitou libovolně zvolenou přesností. Ritzova metoda hledá přibližné (konečné) řešení spojitého problému aproximací báze funkcí. Přesnost řešení se zvýší zvyšováním stupně polynomu. [8]

Dnes má MKP mezi numerickými metodami zcela dominantní postavení. Používá se pro řešení problémů pružnosti a dynamiky. Její variační formulace umožnila rozšíření na řešení proudění kapalin a plynů, vedení tepla, záření, elektromagnetismus, akustiku, piezoelektrické děje, mechaniku hornin atd. Metoda vychází z variačních principů. O MKP existuje obrovské množství publikací a je jí věnována řada konferencí. Rozvoj programových systémů pracujících s touto metodou začal v letech 1970 – 1980. Dnes je k dispozici velké množství komerčních systémů, například: ANSYS, ABAQUS, Cosmos, Nastran, Patran, Marc... [9], [10]

V posledních třiceti letech mají poznatky vedoucí k správné volbě výpočetního modelu a interpretace výsledků výraznou převahu nad matematickou a programátorskou stránkou řešené problematiky. Zde hrají hlavní roli programy, které na základě vstupních údajů dodají výsledky. Jedná se převážně o vnitřní síly, reakce a deformace. Práce dvou generací inženýrů, matematiků a programátorů vedla k tomu, že dnešní uživatel programu nemusí vědět, jak program na základě zadaných vstupních dat dospěl k výsledku. Od té doby vzrostla kapacita programů i počítačů, díky čemuž je umožněno řešení i nelineárních úloh. Tímto faktem jsou však ovlivněny i potřebné znalosti, které byly dříve vzhledem k tehdejší výpočetní technice nepodstatné. Uživatel nemusí znát to, co se odehrává mezi vstupními a výstupními údaji, tedy způsob transformace vstupní informace do výstupní, detaily matematických algoritmů, řešení rozsáhlých soustav rovnic, vnitřní kódování atd. [10]

V současnosti je možné řešit úlohy s textiliemi, jako je například simulace nafukování airbagů, pevnost švů, splývavost oděvu a mnoho dalších. Přesto jsou simulace textilních materiálů problematické. Hlavním důvodem je nelineární chování textilního materiálu při jeho zatěžování, dalším důvodem je nízká ohybová tuhost, která vede k velkým deformacím již při malých zatíženích. [8]

2.2 PRINCIP METODY

Název metody zdůrazňuje skutečnost, že základním stavebním kamenem je prvek konečných rozměrů. Principem metody je rozdělení řešené oblasti na konečný počet podoblastí - prvků. Jde o tzv. diskretizaci problému. Tyto prvky mohou být 1D, 2D a 3D. Na modelu tělesa je třeba vytvořit síť konečných prvků, která je složena z prvků (elements) a uzlů (nodes), příklad této sítě je zobrazen na obr 18. Pro každý typ prvku je charakteristický počet a poloha jeho uzlů. Uzly sítě jsou body, v nichž hledáme neznámé parametry řešení. Hustota a topologie prvků sítě zásadně ovlivňuje kvalitu výsledků a také výrazně ovlivňuje čas nutný pro řešení. [9]

Skutečným omezením je pouze kapacita dostupného hardwaru a časové nároky na výpočet. Řešením, které hledáme, jsou např. deformace, posuv, rychlost, napětí atd. Neznámé funkce, představující spojité řešení problému, hledáme přibližně ve formě lineární kombinace předem vhodně zvolených funkcí tzv. básových funkcí a neznámých

parametrů řešení. Z posuvů jsme pak schopni vypočítat přetvoření a napětí. Od hledání spojitých funkcí tak přejdeme na hledání konečného počtu parametrů - posuvů v uzlech sítě. Východiskem jsou přitom variační principy mechaniky, v případě deformační varianty MKP je východiskem Lagrangeův variační princip Π , který lze vyjádřit vztahem (4). Tento princip vychází z řešení nalezení minima funkcionálu, resp. stavu, kdy určitá forma energie zkoumaného tělesa obsahuje stacionární hodnoty [8], [9], [11]

$$\Pi = W - P, \quad (4)$$

kde W - energie napjatosti tělesa Ω

$$W = \int_{\Omega} \sigma^T \cdot \varepsilon \cdot dV, \quad (5)$$

kde P - potenciál vnějšího zatížení

$$P = \int_{\Omega} u^T \cdot o \cdot dV + \int_{\Gamma_p} u^T \cdot p \cdot dS \quad (6)$$

V uvedených vztazích vystupují sloupcové matice

posuvů $u^T = [u, v, w]$

přetvoření $\varepsilon^T = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}]$

napětí $\sigma^T = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}]$

objemového zatížení $o^T = [o_x, o_y, o_z]$

plošného zatížení $p^T = [p_x, p_y, p_z]$

Dalším postupem řešení problému je diferenciální princip, kdy je řešení dosaženo soustavou diferenciálních rovnic. Řešení problému lze provést analyticky nebo numericky. Analytické řešení využívá matematických vztahů integrálního a diferenciálního počtu. Toto řešení je přesné a jednoznačné a lze je aplikovat pro jednodušší úlohy. Numerické řešení spočívá v převedení hledaného problému neznámých funkcí spojitého kontinua na problém hledání konečného počtu parametrů. Dochází

k diskretizaci spojité oblasti. Výhodou numerických metod je, že umožňují řešit i problémy na složitějších tělesech, na rozdíl od analytického přístupu, kdy lze řešit jen tělesa elementární, která se jako strojní součásti vyskytují zcela výjimečně. Výhodou analytických metod je to, že jako výsledek řešení dostaneme závislost mezi vstupními a výstupními veličinami a to v nekonečně mnoha bodech na rozdíl od MKP, kde dostáváme výsledek v konečném počtu bodů (uzlů sítě). [8], [9]

2.3 PROGRAM ANSYS WORKBENCH

Simulační software ANSYS je celosvětově nejpoužívanější software pro technické simulace. Pracuje s metodou konečných prvků. Program umožňuje organizacím s jistotou předpovědět, jak jejich výrobek bude fungovat v reálném světě. Software pokrývá celé spektrum fyziky, poskytuje přístup k prakticky jakékoli oblasti inženýrské simulace. Velkou výhodou programu je umožnění simulace testů, které by jinak nebylo možné. [9]

Platforma ANSYS Workbench je komplexní a integrovaný simulační systém. Sdružuje široké spektrum pokročilých technologií, které jsou použity v programech od společnosti ANSYS. Unikátní prostředí programu umožňuje propojení projektu ve formě vývojového diagramu, díky kterému lze na první pohled pochopit stav analýzy. Filozofií tvůrců platformy Workbench je „táhni a pusť“. Je tedy možné pomocí myši jednoduše přetáhnout data např. ze strukturální analýzy do proudové. Systém obsahuje všechny potřebné komponenty pro vytvoření projektu: od geometrie přes tvorbu sítě a nastavení výpočtu až po vyhodnocení výsledků. Aplikace, začleněné do prostředí ANSYS Workbench, umožňují různá nastavení např. rozměrů v geometrii, síti, v materiálových vlastnostech, v okrajových podmínkách atd. Tyto stupně volnosti definované v rámci aplikace jsou řízeny přímo z okna projektu. Změny lze provádět v kterékoli části simulace, program zařídí aktualizaci všech změn a upozorní uživatele na nutnost spuštění opětovného výpočtu. Samozřejmostí je propojení s CAD systémy a podpora dalších programů pro vytváření složitější geometrie. [13]

2.4 MODELY ELASTICKÝCH MATERIÁLŮ

Materiálové modely popisují chování materiálu, tedy vztah mezi napětím a deformací. Modely pro elastické materiály jsou definovány pomocí Hookeova zákona. Mohou být popsány vhodnou energeticky konjugovanou dvojicí, kterou pro přirozený stav materiálu (kontinua) bez vlastních pnutí je možné zapsat v obecném tvaru vztahem (7)

$$\Sigma = \sigma_{ij} = D_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}, \quad (7)$$

kde D_{ijkl} - symetrický tenzor materiálových elastických koeficientů – je funkcí posuvů.

Tento tenzor má 81 skalárních koeficientů. Vzhledem k symetrii tenzoru napětí a deformace se sníží na 21 obecně skalárních koeficientů anizotropního materiálu. Taková anizotropie je ojedinělá. Z tohoto tenzoru jsou odvozeny dva modely, které se nejčastěji vyskytují v praxi, a sice model ortotropního a transverzálně izotropního materiálu. [12]

Nelineární elastické materiálové modely mají vhodné použití pro popis chování pryží, pěn a biomateriálů. Tyto materiály jsou schopny velkých a zároveň vratných deformací. Vztah mezi napětím a deformací je silně nelineární. Velké deformace jsou běžným důsledkem působení sil. K těmto velkým deformacím dochází u textilních materiálů během jejich zpracování, používání i údržbě. Modelování nelineárních úloh s velkými deformacemi je důležitou součástí MKP, která však není jednoduchá. Jak již bylo zmíněno, modelování textilních materiálů je náročné a do jisté míry problematické. Hlavním důvodem je nelineární chování textilního materiálu při jeho zatěžování, dalším důvodem je nízká ohybová tuhost, která vede k velkým deformacím již při malých zatíženích. Hyperelastické materiály lze studovat prostřednictvím konstitutivních modelů. Těmi nejvýznamnějšími jsou Neo-Hookův, Arruda-Boyceův, Ogdenův a Mooney-Rivlinův model. [8], [14]

Při popisu těchto materiálových modelů se vychází z funkce hustoty deformační energie W . Derivací této funkce dle deformace se získá napětí. Při definici této funkce se využívají deformační invarianty, které jsou definovány na základě třech protažení λ .

Deformační invarianty jsou definovány těmito vztahy:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \quad (8)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2, \quad (9)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2, \quad (10)$$

kde $\lambda_{1,2,3}$ jsou složky poměrného prodloužení v jednotlivých směrech a lze je definovat dle vztahu (11)

$$\lambda = \frac{L}{L_0}, \quad (11)$$

kde L - délka vzorku po deformaci (při přetrhu)

L_0 - původní délka vzorku.

Chování hyperplastických materiálů je komplikovanější a velice rozdílné od chování materiálů kovových. Pro získání materiálových konstant je nutné provést různé zkoušky těchto materiálů. Mezi standardní patří jednoosé a dvojosé (biaxiální) namáhání. [8], [14]

2.4.1 LINEÁRNÍ ELASTICKÝ IZOTROPNÍ MODEL

Pokud se vlastnosti materiálu nemění spolu s jeho směrem, považujeme tento materiál za izotropní. [12]

Tento model je základní a také nejjednodušší materiálový model. Řídí se Hookovým zákonem, tzn. že napětí je lineárně proporcionalní přetvoření (deformace). Pro definici tohoto materiálového modelu je třeba znát pouze dva základní materiálové parametry, kterými jsou model pružnosti v tahu E a Poissonovo číslo μ . Nicméně pro vyhodnocení je třeba znát i hodnotu meze kluzu tohoto materiálu. [14]

2.4.2 LINEÁRNÍ ELASTICKÝ ORTOTROPNÍ MODEL

Tento model materiálu se také řídí Hookovým zákonem, dovoluje však zadat různé hodnoty materiálových vlastností ve dvou navzájem kolmých směrech. Pro popis ortotropního modelu je třeba zadat celkem 9 nezávislých elastických vlastností. Jedná se o moduly pružnosti ve třech směrech E_x, E_y, E_z , tři Poissonova čísla $\mu_{xy}, \mu_{yz}, \mu_{zx}$ a tři

smykové moduly G_{xy}, G_{yz}, G_{zx} . Při použití tohoto modelu je nutno také znát mez kluzu ve všech směrech. [14]

2.4.3 NEO-HOOKŮV MODEL

Tento model byl navržen Ronaldem Rivlinem roku 1948 a patří mezi první modely v této oblasti. Model je podobný Hookovu zákonu, může být použit pro odhad nelineárních závislostí napětí na přetvoření i za předpokladu větších deformací. Je jednoduchý a jeho použití je vhodné pro polymerní materiály. Tento model je jednodušší variantou Mooney-Rivlinova modelu. [8]

2.4.4 ARRUDA-BOYCEŮV MODEL

Tento model je založen na statistické mechanice a využívá se nejčastěji pro popis chování pryží a jiných polymerních materiálů. Předpokladem modelu je nestlačitelnost materiálu. [8]

2.4.5 OGDENŮV MODEL

Tento model je popsán pomocí funkce vyjadřující hustotu deformační energie. Byl sestaven R. W. Ogdenem a je používán pro popis hyperelastických materiálů. Jeho využití je možné i pro popis nelineárního chování pryží, polymerů a biologických látek. Vykazuje velmi dobrou shodu s experimentálně získanými daty při velkých deformacích. Předpokladem modelu je izotropnost a nestlačitelnost popisovaného materiálu. [8], [14]

2.4.6 MOONEY-RIVLINŮV MODEL

Tento model zveřejnil Melvin Mooney roku 1940 a roku 1948 byl doplněn Ronaldem Rivlinem. Model popisuje hyperelastické chování materiálů, ve kterých je funkce hustoty deformační energie lineární kombinací dvou redukovaných invariantů Cauchy-Greenova tenzoru přetvoření. Model je využíván pro popis nelineárního chování pryží, polymerů a biologických látek, podobně jako Ogdenův model, ale tento model je sofistikovanější. Tento model je víceparametrový, může mít 2,3,5 nebo 9 parametrů. Volbou vhodného počtu parametrů lze dobře proložit získaná experimentální data a tím dokonale popsat chování materiálového modelu. Dvouparametrový model se obecně používá pro přetvoření menší než 100 %. [8], [14]

2.5 TVORBA MODELU

Prvním krokem k tvorbě správného modelu je definování materiálových vlastností. V programu ANSYS Workbench je knihovna s již definovanými materiály, z níž je možné si daný materiál vybrat. Pokud tento materiál definován není, je nutné ho nejdříve definovat. Tento postup je popsán dále. Dalším krokem je vytvoření geometrie modelu, např. kvádrů. Tato geometrie se poté pokryje sítí konečných prvků. Tato síť musí mít dostačující počet uzlů a prvků. Při vytváření sítě je nutné si uvědomit, že nemůže mít nahodilý tvar jako např. pavučina, ale že její tvar musí co nevíce odpovídat tvaru síťovaného tělesa. V případě jednodušších geometrických útvarů, jako je např. kvádr nebo válec, musí mít síť pravidelný čtvercový tvar. Hustota této sítě významně ovlivňuje dobu výpočtu i výsledek řešení. Na model pokrytý sítí je poté možné aplikovat okrajové podmínky, které popisují, jak je těleso uloženo a zatíženo. Okrajové podmínky jsou silové a deformační. Posledním krokem je spuštění výpočtu, poté je možné přejít k vyhodnocení a následné interpretaci výsledků.

Pro simulaci chování textilních materiálů je důležité uvědomit si, že simulovat strukturu pleteniny je velice obtížné. Z tohoto důvodu se tato struktura nahrazuje kontinuem. Toto řešení vysvětluje Stříž ([15], s. 5): „Výzkum chování textilií, jako geometricky i fyzikálně nelineárního, směrově orientovaného útvaru, vyžaduje stanovení jeho mechanických charakteristik. Jednou z nejrozšířenějších metod řešení problémů mechaniky textilií je náhrada textilního útvaru spojitým prostředím – kontinuem se stejnými mechanickými vlastnostmi jako zkoumaná textilie.“ Pojem „kontinuum“ je nutné chápat jako model hmoty a uvědomit si přitom, že „kontinuita“ – spojitost prostředí je vlastně iluze, která je v rozporu se skutečnou strukturou materiálu. Model kontinua, přijatý pro řešení určité třídy úloh, bude dávat „správné“ výsledky, bude-li použit v rámci své platnosti. To bohužel nelze matematicky dokázat. Jediným kritériem je experiment. Pokud nejsou výsledky experimentu v rozporu s tím, co model předpovídá, je model považován za dobrý.

3 KOMPRESNÍ TERAPIE

Již v antice se při léčbě otoků a venózních onemocnění používalo ovíjení dolních končetin. Na skalních kresbách ze Sahary byla nalezena kresba, která zachycuje tanečnici s výrazně oteklými a ovinutými dolními končetinami. Stáří této kresby se odhaduje na více než 4 000 let. Tento objev dokazuje používání kompresní terapie v její nejjednodušší formě. Ve středověku se používaly kompresní obvazy z lněného plátna, jednalo se o stahovací (šněrovací) punčochy. Staří Egypťané používali plátěné obvazy napuštěné hojivými pryskyřicemi nebo vytvářeli obvazy z vosku. V 15. století poprvé popsal Giovanni Savonarola nakládání bandáže směrem od okrajových částí končetin. V 16. – 17. století používal Fabricio d'Aquapendente šněrovací punčochy ze psí kůže. Objev gumy a její zpracování na tkalcovském stavu v 19. století byl základem výroby elastických obinadel a punčoch. Na přelomu 19. a 20. století lékaři Paul Unna a Heinrich Fischer poprvé vyvinuli účinné kompresní techniky. Poslední desetiletí znamenala výrazný přínos použitím polyamidu a polyuretanu, které těmto elastickým materiálům dodávají výrazně lepší pružnost a přizpůsobivost. [16]

Pod pojmem kompresní terapie rozumíme způsob léčby, při kterém se k odstranění otoku dolních končetin používá kompresní obvaz nebo punčocha. Kompresní terapie patří dodnes k neúčinnější léčbě onemocnění žil. Komprese zlepšuje transportní mechanismy v dolních končetinách a působí proti hromadění venózní krve. Je důležité vědět, že žilní chlopně fungují jako klapky, podporují zpětný transport venózní krve ve zdravé dolní končetině, čímž určují směr toku krve směrem k srdci a zabraňují nežádoucímu zpětnému toku venózní krve. Bylo prokázáno, že kompresní obvazy nebo punčochy způsobí stlačení a tím i zúžení rozšířených žil. Vyvíjejí tlak na měkkou tkáň zvenčí a tím poskytují vnější oporu proti vnitřnímu tlaku žil a tkání. Toto zúžení vede k zrychlení krevního proudu a zlepšení cirkulace krve v malých cévách, které vyživují kůži a podkožní vrstvy. Zdravotní kompresní podkolenky mají příznivé účinky i na hojení bércových vředů. Při pohybu se v důsledku tlaku na svalstvo přepumpuje více krve ze žil směrem k srdci. Díky tlaku na žilní stěnu se zlepšuje celková funkce chlopní. Končetina neotéká, je štíhlejší a účinně vzdoruje opětovnému hromadění vody v tkáni. [16], [17]

Pro nemocné je důležitým přínosem úleva od bolesti a tím i zlepšení kvality života. Tento způsob léčení však může i škodit, a to hlavně při sklerotickém onemocnění tepen

dolních končetin. Léčba je také nebezpečná u nemocných se srdečním selháváním, kde by rychlé uvolnění objemu žilní krve z dolních končetin po sundání obinadla nebo punčochy prudce zvýšilo zatížení poškozeného srdečního svalu. Dalším omezením jsou zánětlivé kožní projevy. Důležitá opatrnost je také u diabetiků trpících postižením periferního nervového systému dolních končetin. [16]

Výše popsané zdravotní kompresní podkolenky se řídí normou ČSN P ENV 12718 (841080) - Zdravotní kompresivní punčochy. Tato norma byla účinná v letech 2003 – 2010, poté byla zrušena bez náhrady a platila pro zdravotní kompresní punčochy, používané jako zdravotní prostředek pro léčení cévních nebo lymfatických nemocí nohou. Sportovní kompresní podkolenky normované nejsou, proto si každý výrobce určuje vlastní značení. Z průzkumu trhu bylo zjištěno, že i přes jiné značení výrobců odpovídají hodnoty komprese údajům dle normy ČSN P ENV 12718.

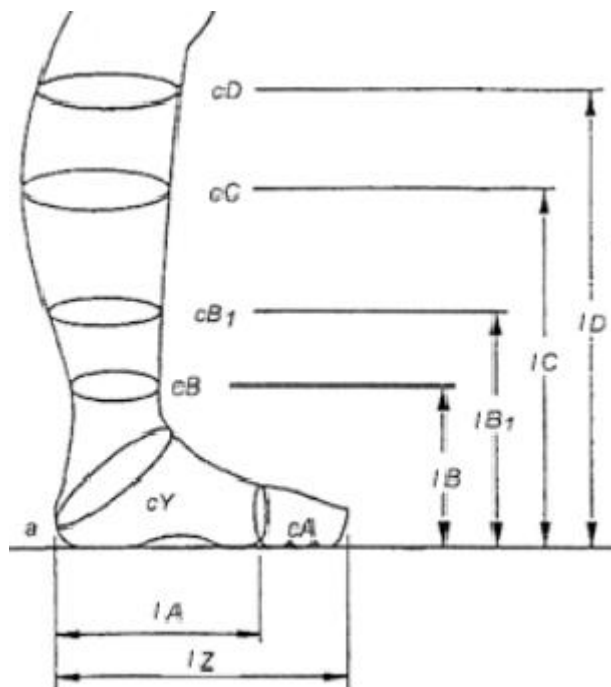
Norma stanovuje požadavky a uvádí zkušební metody pro zdravotní kompresní punčochy včetně punčoch rozměrových, vyráběných na zakázku z přírodních nebo syntetických a elastických vláken. Roztažnost těchto výrobků musí být dle normy v obvodovém směru nejméně 120% a v podélném směru nejméně 30%. Norma definuje důležité pojmy: *komprese* jako tlak, kterým punčocha působí na nohu, *zdravotní kompresní punčochu* jako punčochu s odstupňovaným stlačením k léčení nemocí nohy pomocí definovaného tlaku působícího stanoveným způsobem na nohu, *třídy komprese* jako kompresní stupně, ve kterých jsou punčochy vyráběny a jsou kategorizovány podle komprese u kotníku (hodnoty kompresních tříd jsou uvedeny v tabulce 1) a pojem *reziduální tlak* jako tlak v určitém bodě, vyjádřený jako procentuální míra tlaku u kotníku. [18]

Tabulka 1: Třídy komprese

Třídy komprese	Komprese u kotníku	
	hPa	mmHg (1mmHg = 1,333hPa)
A – velmi slabé	13 až 19	10 až 14
I – slabé	20 až 28	15 až 21
II – střední	31 až 43	23 až 32
III – silné	45 až 61	34 až 46
IV – velmi silné	65 a vyšší	49 a vyšší

Michaela Mencáková

Norma stanovuje body pro měření tlaku dle obr. 5, viz tabulka 2, a v těchto bodech udává délky, viz tabulka 3 a obvody, viz tabulka 4.



Obr. 5: Měřicí body, délky a obvody na lidské noze [19]

Tabulka 2: Měřicí body označované na noze

Měřicí bod	Popis měřicího bodu
a	spodek nohy na patě
A	přední část nohy v místě odkud vyrůstají prsty
B	kotník v obvodu v jeho minimálním obvodu
B1	bod, ve kterém Achillova šlacha přechází v lýtkový sval
C	lýtko v jeho největším obvodu
D	výška těsně pod Tuberositas Libiae

Tabulka 3: Délky nohy

Kód pro délku	Délka nohy
IB	vzdálenost naměřená z a do B
IB1	vzdálenost naměřená z a do B1
IC	vzdálenost naměřená z a do C
ID	vzdálenost naměřená z a do D
IA	vzdálenost naměřená od nejvíce vyčnívající části paty do a (délka chodidla bez prstů)
IZ	horizontální vzdálenost mezi svislicemi dotýkajícími se konce nejvíce vyčnívajícího prstu a nejvíce vyčnívající části paty (celková délka chodidla)

Tabulka 4: Obvody nohy

Kód pro obvod	Obvod nohy
cA	obvod naměřený v A
cB	obvod naměřený v B
cB1	obvod naměřený v B1
cC	obvod naměřený v C
cD	obvod naměřený v D
cY	obvod v Y naměřený při maximálním dorsálním protažení

Reziduální tlaky punčochy musí ležet v oblasti určené hodnotami uvedenými v tabulce 5.

Tabulka 5: Rozsahy tlakového profilu podkolenky

Třídy komprese	Procentuální poměr tlaku vztaženému ke kotníku		
	v bodě B1	v bodě C	v bodě F
A	70 - 100	50 - 80	20 - 60
I – slabé	70 - 100	50 - 80	20 - 60
II – střední	70 - 100	50 - 80	20 - 50
III – silné	70 - 100	50 - 80	20 - 40
IV – velmi silné	70 - 100	50 - 80	20 - 40

Sportovní kompresní podkolenky jsou určeny především pro běžce a cyklisty, uplatní se ale i v dalších sportovních aktivitách založených na běhu, chůzi nebo cyklistice. Vhodné jsou i tam, kde dochází k velkému zatěžování dolních končetin, např. pro dlouhé cestování, dlouhé stání nebo dlouhé sezení a pro těhotné ženy, protože eliminují tvorbu otoků a zamezují pocitu tzv. těžkých nohou, navíc slouží jako prevence vzniku cestovní trombózy. Při sportu podkolenky zabraňují svalovým křečím, podporují cirkulaci krve, čímž zvyšují výkon a oddalují únavu, snižují svalové otřesy a tím i riziko poranění svalů, urychlují odplavování kyseliny mléčné ze svalů a tím urychlují regeneraci po výkonu.

Kompresní podkolenky se vybírají dle dvou kritérií. Prvním je samozřejmě velikost chodidla, druhým je obvod lýtko. Tento údaj je velice důležitý, protože při špatně změřeném obvodu lýtko bude podkolenka působit jiným tlakem, než který byl úmyslem výrobce a vybrán kupujícím. Sportovní kompresní podkolenky mají, stejně jako zdravotní kompresní podkolenky, odstupňovanou kompresi, tzn. nejsilnější tlak je v kotníkové části podkolenky a směrem vzhůru k lýtkovému svalu se tlak snižuje.



Obr. 6: Sportovní kompresní podkolenka [23]

Kompresní podkolenky jsou vyráběny z rychleschnoucích materiálů, převážně ze syntetických vláken, díky čemuž mohou svaly pracovat při optimální teplotě i během intenzivního tréninku. Často jsou s antibakteriální úpravou, která zamezuje množení bakterií a pohlcuje pachové látky. Jsou v mnoha barevných provedeních, některé druhy jsou opatřeny pásky reflexních bodů pro dobrou viditelnost sportovce i za špatného počasí. Podkolenky jsou anatomicky tvarovány pro každou nohu zvlášť, jsou vyztuženy na důležitých místech, např. v oblasti Achillovy šlachy, v oblasti kotníku a paty. Zajímavostí jsou kompresní návleky značky ROYAL BAY[®], která vyrábí dva druhy kompresních návleků. První je s odstupňovanou kompresí, druhý typ je vyráběn s největší kompresí v oblasti lýtkového/stehenního svalu. Tuto kompresi značka nazývá cílenou a má za úkol poskytnout sportovci maximální podporu a vyšší omezení bolesti z únavy svalů. U podkolenek se tato cílená komprese nevyskytuje. Renomovaní výrobci při vývoji kompresních podkolenek spolupracují s vrcholovými sportovci a získávají od nich zpětnou vazbu. [20], [21], [22], [23]

3.1 MĚŘENÍ KOMPRESSE

V následující kapitole jsou stručně popsány vybrané přístroje a způsoby pro měření komprese kompresních výrobků.

- Autor **Vladimír Nikolajevič FILATOV** 1984 [24] zmiňuje dva způsoby měření komprese: přímý a nepřímý. Přímý způsob měření komprese spočívá na pneumatických nebo mechanických principech konstrukce čidel pro měření tlaku. Těchto přístrojů je velké množství, významným zástupcem je pneumatické zařízení Dr. Zigga pro měření tlaku. Toto zařízení se skládá z čidla, které je spojeno latexovou trubicí s manometrem, který se podobá běžnému tonometru pro měření krevního tlaku. Pro změření působení tlaku na lidské tělo je čidlo zavedeno mezi elastický výrobek a povrch lidského těla. Pomocí pryžového balónku, který je spojen s manometrem, se v čidle nahustí tlak 2,6 kPa (20 mmHg). Potom se pomalu posouvá po povrchu lidského těla pod elastickým výrobkem. Tlak působící na tělo je zaznamenán na manometru. Na základě hodnot z manometru na různých místech výrobku se zaznamená graf, který udává změnu tlaku. Jako nepřímý způsob měření autor uvádí přístroj Hatra a měření komprese pomocí trhačího stroje. Oba způsoby jsou popsány dále.

- Příklad přístroje **HATRA** [24], [25]. Konstrukce přístroje, viz obr. 7, simuluje tvar lidské nohy. Tento rozměr je nastavitelný, přístrojem lze tedy simulovat různé obvody lidské nohy. Toto je vhodné zejména pro kompresní výrobky nestandardních rozměrů, které jsou zhotovovány na zakázku. Před měřením se na kompresní podkolenku či punčochu vyznačí místa pro měření. Poté se výrobek natáhne na formu, která je složena z pohyblivé a nepohyblivé destičky. Výrobek se natáhne do rozměrů simulujících běžné používání. Poté se měřicí hlava přístroje na boku přístroje Hatra přitlačí k výrobku a na displeji se odečte síla, kterou působí měřený výrobek na čidlo. Tato síla se poté přepočítává na milimetry rtuťového sloupce.

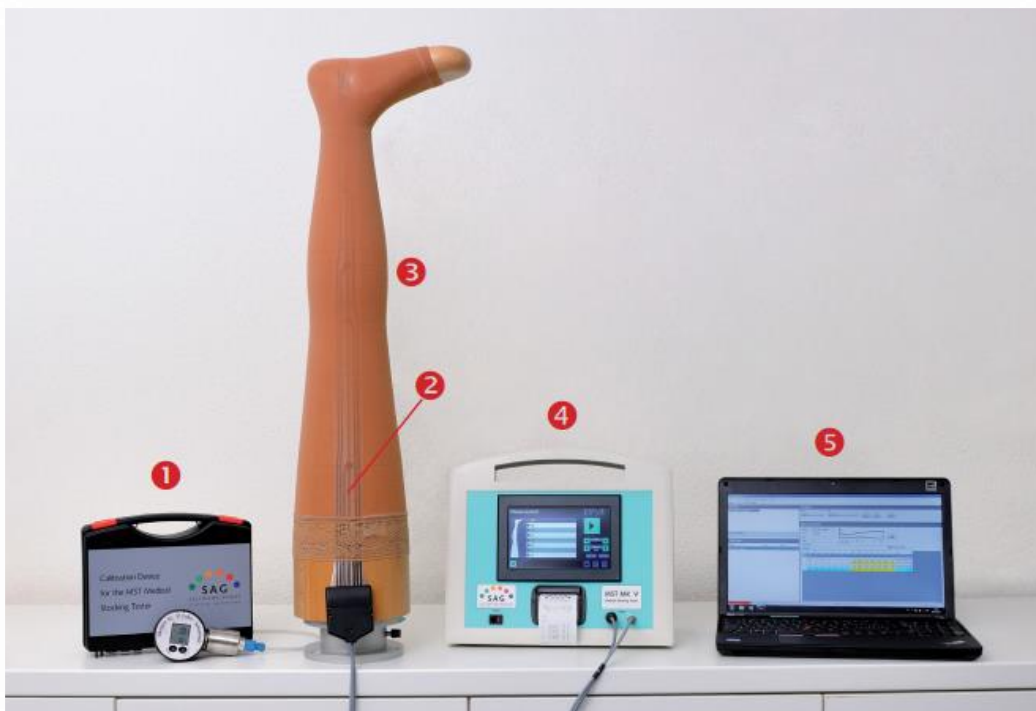


Obr. 7: Přístroj Hatra [25]



Obr. 8: Měření na přístroji Hatra [25]

- Přístroj **MST MK V** (Medical Stocking Tester - model 5. generace) 2014 [26] je tlakový přístroj pro měření lékařské komprese a podpůrné punčochy. Ploché měřicí sondy nevytvářejí nežádoucí vybouleniny na elastickém materiálu. Měření je tedy na rozdíl od předešlých způsobů s čidlem na pneumatickém principu a je přesnější. Výsledný tlak není nutné převádět pomocí tabulek, hodnoty se zobrazí na obrazovce počítače v příslušném programu. Výhodou je, že přístroj je mobilní a lze kontrolovat kvalitu přímo ve výrobě i laboratořích. Měření je rychlé, přesné a pohodlné. Sondy umožňují nejméně 300 měření, jsou k dispozici ve 3 různých délkách a snímají měřicí body: B, B1, C, D, E, F, G. Dřevěná noha je vytvořena na základě normy RAL-GZ 387/1, společnost také vyrábí dřevěné modely nohou přímo na přání zákazníka. Díky těmto možnostem lze měřit tlak působící elastickou textilií na povrch lidského těla jak u standardního zboží, tak u výrobků vyrobených na zakázku.



Obr. 9: Přístroj MST MK V (Medical Stocking Tester) [26]

1 – Kalibrační jednotka (vysoce přesný digitální manometr), 2 – sondy, 3 – dřevěná noha, 4 – MST MK V, 5 – Software pro Windows

- Ve své diplomové práci **Peter JENDRICHOVSKÝ** 2015 [27] popisuje měření komprese pomocí trhacího přístroje. Tento způsob měření zmiňuje i Filatov ([23], s. 96-97). Princip je v roztažení vzorku kotníkové části kompresní podkolenky až na rozměry, které jsou shodné s rozměry při navlečení podkolenky na plastovou končetinu, viz příloha A, které vede ke zjištění potřebné síly. Tato síla se na základě Laplaceova vztahu (12) přepočítá na jednotku komprese, kterou je milimetr rtuťového sloupce. Pro získání výsledků v Pa je nutné znát a použít převodní vztah: 1 mmHg = 133,32 Pa

$$L = \frac{(2 \cdot \pi \cdot F)}{S}, \quad (12)$$

kde F – síla [N]
 S – plocha [m²]



Obr. 10: Měření komprese pomocí trhacího přístroje [27]

4 VYUŽITÍ KOMPRESY V KONSTRUKCI ODĚVŮ

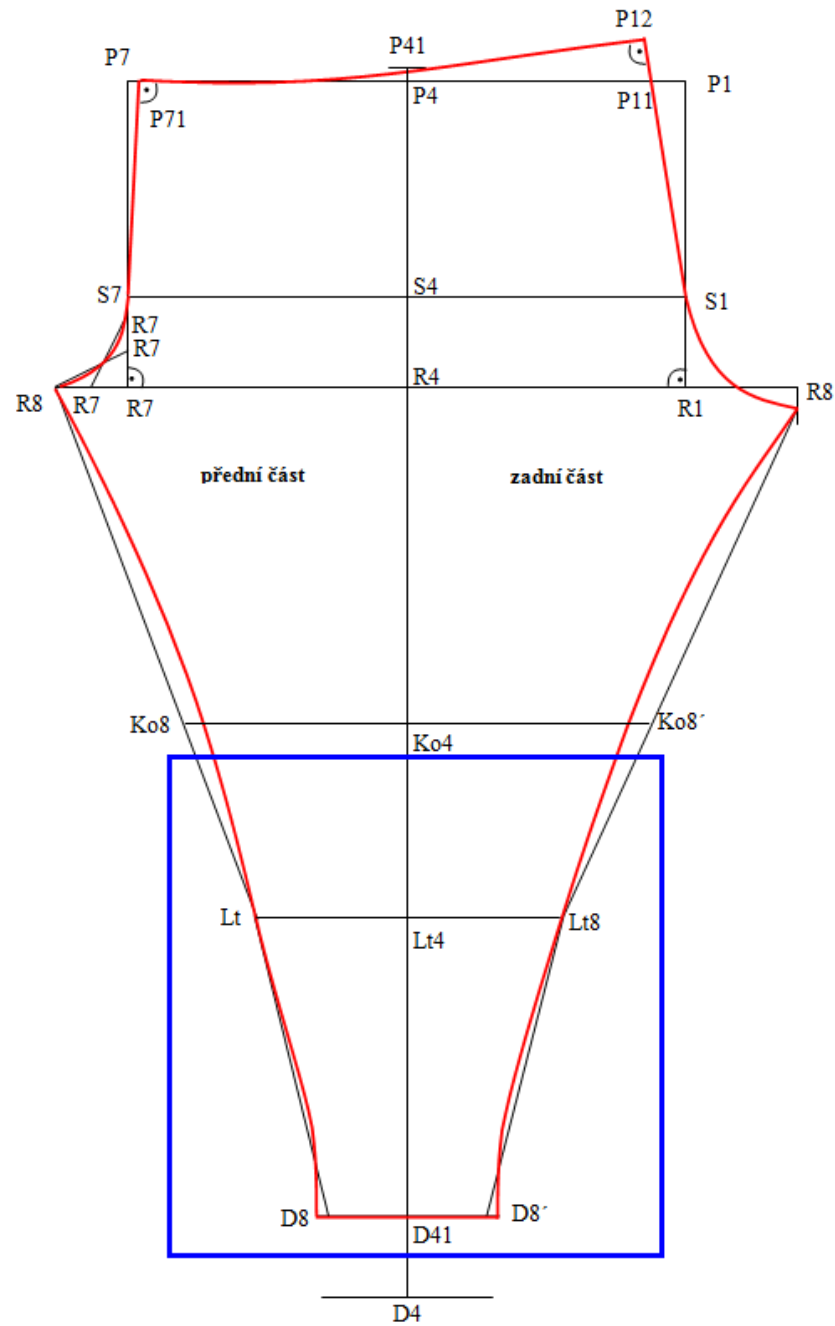
Konstrukce střihu je základem pro zhotovení oděvu. Podstatou je rozvinutí povrchu lidského těla do plošného útvaru, jelikož plošné textilie jsou výchozím materiálem pro výrobu oděvu. Rozdělením plošných textilií na díly pomocí dělicích bodů a nástřihů a jejich následným spojením je vytvořeno objemové těleso, tedy vlastní oděv. Cílem konstrukce oděvu je dokonalý střih, který je proveden dle střihové šablony, která odpovídá žádanému tvaru daného oděvu. [28]

K dosažení konečného tvaru oděvu je třeba vždy několik kroků. Prvním důležitým krokem je sestavení osnovy konstrukce, tedy základní střihová konstrukce oděvu. Je charakterizována soustavou základních úseček, vycházejících z naměřených rozměrů lidského těla s přidáním nutných přídavek. Výsledek lze přirovnat k sejmutí plochy povrchu lidského těla do rovinného tvaru. Již při výpočtu konstrukčních úseček lze přídávky přizpůsobit vlastnostem konkrétního materiálu, ze kterého bude výsledný oděv zhotoven. Dalším krokem je vytvoření modelové konstrukce, která tvarově dotváří základní konstrukci oděvu a také detailní řešení pro daný model. Zde jsou již uplatněny všechny přídávky, tzn. na volnost pohybu i technologické přídávky pro tloušťku materiálu. Dotvořením siluety i detailu oděvu modelářskými úpravami dostáváme modelový střih. Posledním krokem je vytvoření střihové šablony, tedy modelový střih s přídávky na švové záložky, potřebné technologické značky, vyznačení detailů, jejich umístění apod. Je vytvořena tak, aby při následném šití již nebylo nutné provádět další úpravy. [28]

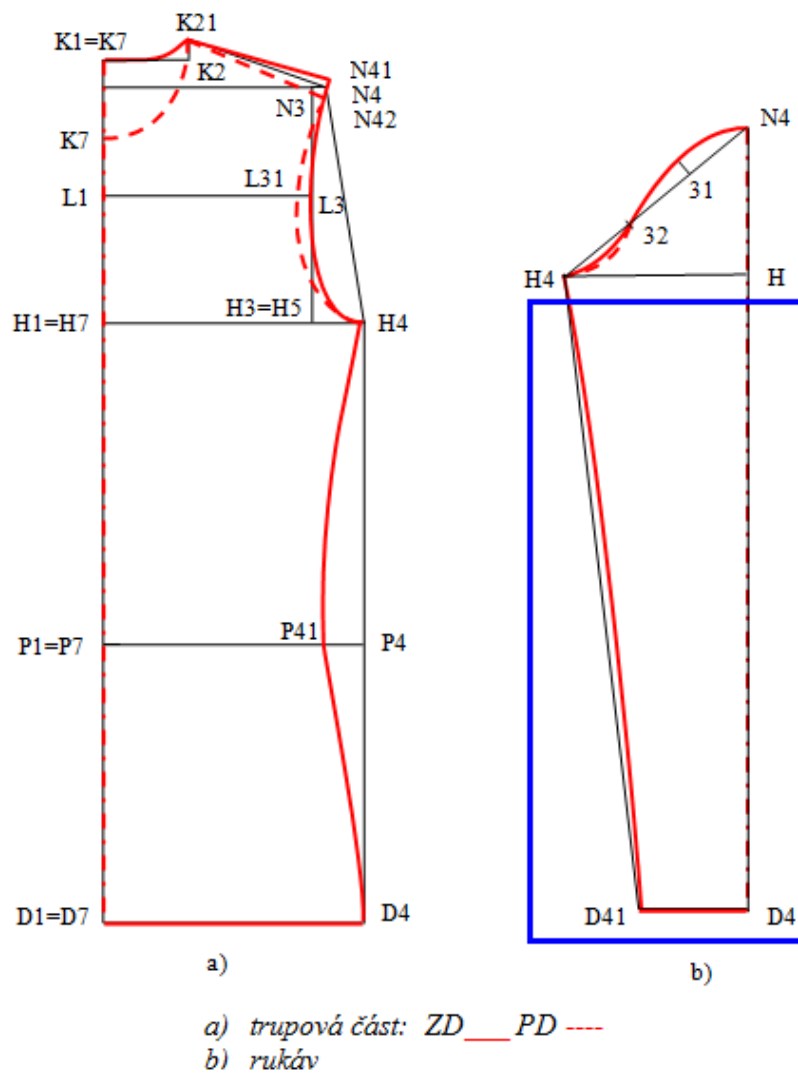
Základní konstrukce může být sestavena dle různých metodik. Podstatou je požadavek, aby rozvinutý plošný útvar, tedy střih oděvu, co nejvíce odpovídal objemové předloze. Dobrá metoda konstruování je tedy ta, která docílí nejvěrnějšího zkopírování lidského těla a požadované přídávky budou zvoleny tak, aby konečný střih odpovídal proporcím dané postavy nebo účelu použití oděvu. [28]

Znalost tvarů lidského těla je důležitá při tvorbě konstrukcí. Když si představíme lidské tělo a budeme se snažit ho rozložit na jednoduché geometrické útvary, zjistíme, že nejčastěji se vyskytuje tvar komolého kužele. Z tohoto důvodu je v této kapitole znázorněna konstrukce střihu dámských legín a dámského trika. V těchto konstrukcích je tvar komolého kužele zvýrazněn modrou barvou. Obě tyto zvýrazněné části oděvu se

svým tvarem podobají tvaru sportovní kompresní podkolenky a bylo by proto možné pro zjištění tlaku, kterým působí na lidské tělo, aplikovat simulační model, který bude vytvořen v rámci experimentu této práce.



Obr. 11: Konstrukce stříhu dámských legín



Obr. 12: Konstrukce střihu dámského trika

Při vytváření konstrukce oděvu je důležité znát vlastnosti materiálu, ze kterého bude oděv vyroben, zejména jeho roztažnost. Vytváříme-li konstrukci pro přiléhavý oděv, hodnoty konstrukčních přídavek je nutné přizpůsobit roztažnosti materiálu. Pokud je cílem oděvu působit na lidské tělo určitým tlakem, dosáhneme toho právě změnou těchto přídavek při vytváření konstrukce. Například bude-li roztažnost materiálu více než 50 %, u konstrukce rukávu dámského trika, viz Příloha B, provedeme zúžení šíře rukávu v dolním kraji o 1,5 cm a prodloužení délky rukávu o 6 cm.

Výborným příkladem využití komprese v konstrukci oděvů pro celé tělo je australská společnost SKINS, která se zabývá výrobou kompresního sportovního oblečení pro muže i ženy. Mezi její produkty patří kompresní kalhoty, trička, tílka, návleky pro dolní i horní končetiny a podkolenky. Produkty poskytují různé stupně komprese, která je potřebná pro zvýšení množství kyslíku dodávaného do namáhaných svalů. Taková komprese, jak již bylo zmíněno, se nazývá dynamicky stupňovaná komprese. Společnost spolupracovala s mnoha vědci a odborníky v Austrálii a společně vyvinuli zařízení, které je schopné komplexně snímat lidské tělo v pohybu. Zařízením snímali sportovce a poprvé v historii byli schopni přesně změřit, jak působí komprese na svaly v pohybu a jak se při vzrůstajícím množství kyslíku v krvi mění jejich tvar. Všechna předchozí měření na sportovcích vždy probíhala ve statické poloze. [29], [30]

Společnost SKINS provedla rozsáhlou studii stovek amatérských i profesionálních sportovců různých proporcí. Použití 3D scanneru umožnilo provést více než 800 000 měření u každého jednotlivého sportovce. Výsledkem je určení 400 klíčových bodů na lidském těle, podle kterých jsou tyto oděvy navrženy a vytvarovány tak, aby zajišťovaly maximální pohodlí. Společnost tak dosáhla maximálně pohodlných střihů i možnosti přesněji docílit dynamicky stupňované komprese. Díky takto podrobnému měření nyní víme, jaké stupně komprese jsou potřebné pro jednotlivé skupiny svalů nejen v klidovém stádiu, ale i při aktivitě a během zotavování po výkonu. Pro výběr velikosti je používán unikátní systém, založený na indexu tělesné hmotnosti (BMI), protože přínosy stupňované komprese se naplno projeví pouze tehdy, pokud oděvy dokonale padnou. Produkty jsou vyráběny osnovním pletením, švy na oděvech jsou účelně umístěny tak, aby fungovaly jako „opěrné body“ poskytující svalům cílenou oporu. Produkty jsou dokonce doporučeny a schváleny Australskou fyzioterapeutickou asociací (Australian Physiotherapy Association). [29], [30]



Obr. 13: Kompresní návleky na lýtka [29]



Obr. 14: Kompresní návleky na ruce [29]

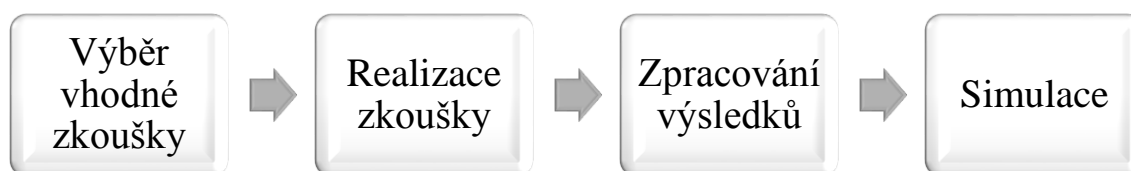
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato část práce je zaměřena na popis materiálu, použitá zařízení, zpracování a vyhodnocení dat z provedených měření. Získaná experimentální data budou použita jako vstupní parametry pro simulační model.

5.1 POSTUP EXPERIMENTU

Pro vytvoření simulačního modelu je nutné zjistit chování materiálu při působení mechanického namáhání. K tomuto účelu je nutné provést vybranou mechanickou zkoušku, v tomto případě byla vybrána statická zkouška tahem. Data získaná z této zkoušky budou vstupními daty pro simulační model. Pro ověření správnosti simulace je nutné realizovat statickou zkoušku tahem také pomocí softwaru ANSYS Workbench a tyto výsledky obou zkoušek vzájemně porovnat. Dalším krokem experimentu je simulace kompresních účinků sportovní podkolenky a vyhodnocení výsledků.

Účelem simulace je zjistit svěrný účinek kompresní sportovní podkolenky, tedy tlak, kterým působí na dolní končetinu nositele při jejím navlečení. Vzhledem k poznatkům z rešeršní části práce bude simulace provedena na jednoduchých geometrických útvarech, kterým je pro simulaci dolní končetiny komolý kužel a pro simulaci kotníkové části kompresní podkolenky válec.



Obr. 15: Schéma provedení experimentu

5.1.1 STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

Dle informací získaných v rešerši byla vybrána vhodná zkouška pro získání potřebných materiálových vlastností. Bude provedena statická zkouška tahem dle normy ČSN EN ISO 13934-1 - Tahové vlastnosti plošných textilií – Část 1: Zjišťování maximální síly a tažnosti při maximální síle pomocí metody Strip, při které budou zjištěny

základní informace pro potřeby simulace. Tato norma vešla v platnost roku 2000 a roku 2013 byla zrušena bez náhrady. Norma uvádí postup pro zjišťování maximální síly a tažnosti při maximální síle u zkušebních vzorků, které jsou v rovnováze s normálním ovzduším pro zkoušení. Zkouška spočívá v plynulém zatěžování zkoušeného vzorku až do jeho přetržení.

Tato norma uvádí podmínky pro měření vzorků ve směru podélném a příčném, pro co možná nejlepší popis chování daného materiálu budou vzorky odebrány ve třech směrech. Těmito směry jsou: podélný, tedy ve směru sloupku pleteniny, příčný, tedy ve směru řádku pleteniny, a dále ve směru diagonálním, tedy pod úhlem 45°. Dle normy ČSN EN ISO 13934-1, byly odebrány vzorky o předepsaných rozměrech. Upínací délka vzorku má být 200 mm, pro materiály s tažností vyšší než 75 % je upínací délka snížena na 100 mm. Bylo nastaveno předepsané předpětí a rychlost posuvu. Parametry potřebné pro provedení zkoušky jsou uvedeny v tabulce 6. [32]

Celý průběh zkoušky je řízen počítačem. Pomocí příslušného počítačového programu se spustí posuv horní čelisti přístroje a dojde k napínání materiálu do přetrhu. Program zaznamenává nejvyšší pevnost, prodloužení při největší pevnosti a tažnost při největší pevnosti. Výsledky získané touto zkouškou budou sloužit jako vstupní data pro definování materiálového modelu v simulaci.

Tabulka 6: Parametry pro statickou zkoušku tahem

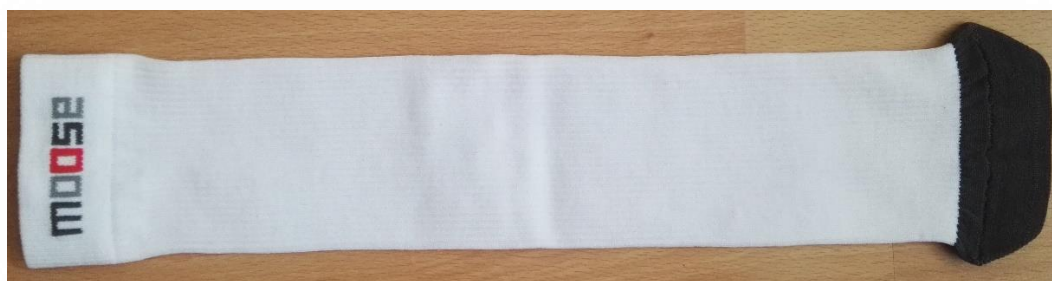
Parametry pro statickou zkoušku tahem	
Počet vzorků v podélném směru	10
Počet vzorků v příčném směru	10
Počet vzorků v diagonálním směru	10
Šířka vzorku	50 mm
Upínací délka	100 mm
Rychlost pohybu čelistí	100 mm/min
Předpětí	2N

5.2 POPIS MATERIÁLU

Testovaný materiál byl poskytnut firmou Pumax, spol. s.r.o.. Jedná se o speciálně zhotovený úplet, který svým zhotovením odpovídá kotníkové části sportovní kompresní podkolenky, viz obr. 16. Složení materiálu je uvedeno v tabulce 7.

Tabulka 7: Složení materiálu

Materiál	Procentuální zastoupení materiálu
Polypropylen	50 %
Polyamid	30 %
Elastan	20 %



Obr. 16: Sportovní kompresní podkolenka – speciálně zhotovený úplet

5.3 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ

Pro zjištění hmotnosti byla použita laboratorní váha společnosti KERN model EG 420-3NM. Váha váží s přesností na 0,001 g.

Pro zjištění tloušťky materiálu byl použit přístroj SDL M034A. Tloušťka textilního materiálu je měřena jako kolmá vzdálenost mezi základní deskou, na které je vzorek textilie umístěn, a kruhovým přitlačným kotoučem, který vyvíjí na plochu textilie stanovený přítlak. Průběh měření je zaznamenán počítačovým programem. Měření je provedeno dle normy ČSN EN ISO 5084 (80 0844): Textilie – Zjišťování tloušťky textilií a textilních výrobků. Dle této normy je stanoven přítlak na 1 000 Pa, velikost přitlačné hlavy při měření 20 cm² a zátěž vzorku 200 g. [33]

Pro zjištění mechanických vlastností materiálu byl použit univerzální zkušební trhací přístroj M350 – C5.

5.4 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

K vytvoření MKP modelu je nutné vyhodnotit mechanické vlastnosti materiálu, které je třeba použít při tvorbě materiálového modelu. Data ze všech měření byla statisticky zpracována.

5.4.1 MĚŘENÍ PLOŠNÉ HMOTNOSTI

Měření plošné hmotnosti bylo provedeno na výše zmíněné laboratorní váze. Bylo měřeno 5 vzorků materiálu o velikosti 100 mm x 100 mm. Statické zpracování výsledků měření je uvedeno v tabulce 8. Výsledky z jednotlivých měření jsou uvedeny v příloze C.

Tabulka 8: Výsledky a statistické zpracování měření plošné hmotnosti

Statistické zpracování	
Aritmetický průměr	3,0362
Rozptyl	0,0000107
Směrodatná odchylka	0,00327
Variační koeficient [%]	0,107
IS (95%)	3,033 - 3,039

5.4.2 MĚŘENÍ TLOUŠŤKY MATERIÁLU

Měření tloušťky bylo provedeno na výše zmíněném přístroji pro měření tloušťky materiálu. Bylo provedeno 10 měření, vždy na jiné části vzorku materiálu. Statické zpracování výsledků měření je uvedeno v tabulce 9. Výsledky z jednotlivých měření jsou uvedeny v příloze C.

Tabulka 9: Výsledky a statistické zpracování měření tloušťky materiálu

Statistické zpracování	
Aritmetický průměr	1,328
Rozptyl	0,002
Směrodatná odchylka	0,043
Variační koeficient [%]	3,269
IS (95%)	1,301 - 1,355

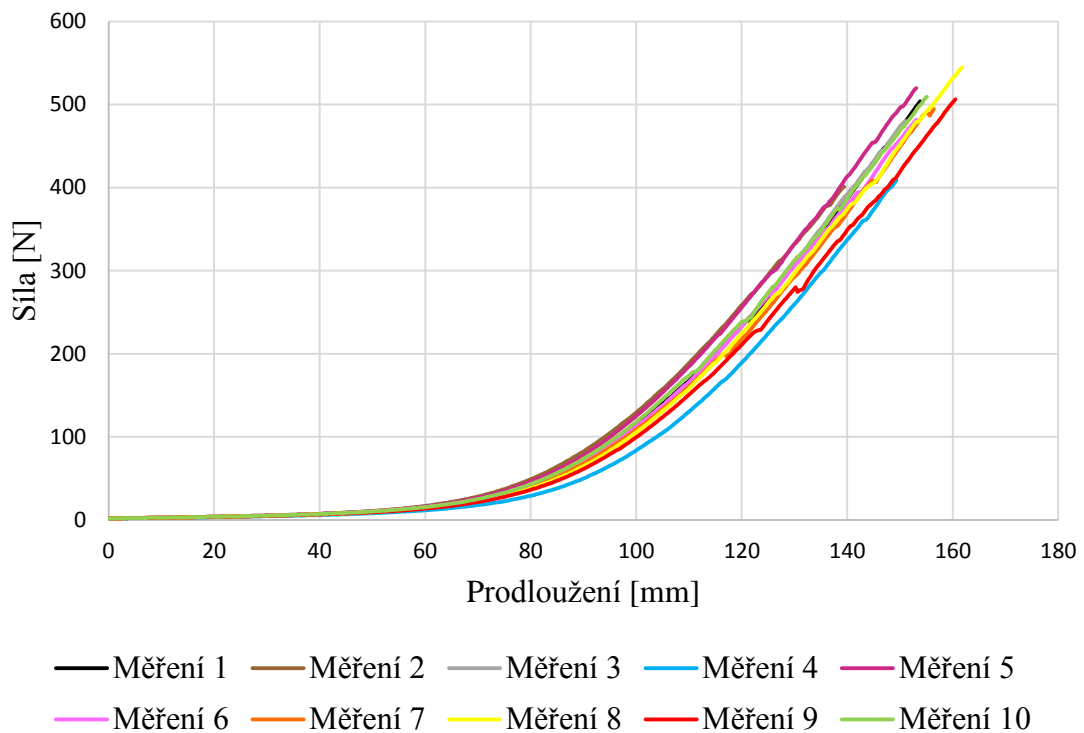
5.4.3 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V PODÉLNÉM SMĚRU

Měření v podélném směru proběhlo dle normy ČSN EN ISO 13934-1 - Tahové vlastnosti plošných textilií – Část 1: Zjišťování maximální síly a tažnosti při maximální síle pomocí metody Strip. Bylo změřeno 10 vzorků materiálu. Výsledky měření a jejich statické zpracování je uvedeno v tabulce 10. Závislost síly na prodloužení je zaznamenána v grafu 1.

Tabulka 10: Výsledky a statistické zpracování měření v podélném směru

Měření	Nejvyšší pevnost [N]	Prodloužení při nejvyšší pevnosti [mm]	Tažnost při nejvyšší pevnosti [%]
1	503,85	153,84	131,867
2	401,97	139,375	114,229
3	480,46	151,107	127,313
4	409,12	149,355	124,483
5	520,3	153,023	127,145
6	481,74	153,098	128,573
7	495,02	156,475	129,688
8	544,8	161,699	135,805
9	506,3	160,529	131,168
10	509,4	155,131	129,286
Statistické zpracování			
Aritmetický průměr	485,296	153,363	127,956
Rozptyl	2112,11347	38,9868797	32,6591673
Směrodatná odchylka	45,958	6,244	5,715
Variační koeficient [%]	9,470	4,071	4,466
IS (95%)	456,81 - 513,78	149,49 - 157,23	124,41 - 131,50
Minimální hodnota	401,97	139,375	114,229
Maximální hodnota	544,8	161,699	135,805

Graf tahové zkoušky v podélném směru



Graf 1: Závislost síly na prodloužení v podélném směru

Bylo provedeno 10 měření. Při každém měření došlo k přetrhu vzorku. Maximální síla nutná pro přetrh vzorku byla 544,8 N. Maximální prodloužení při přetrhu vzorku bylo 161,7 mm. Z uvedeného grafu je zřejmé, že průběhy všech měření jsou velice podobné až do přetrhu vzorku.

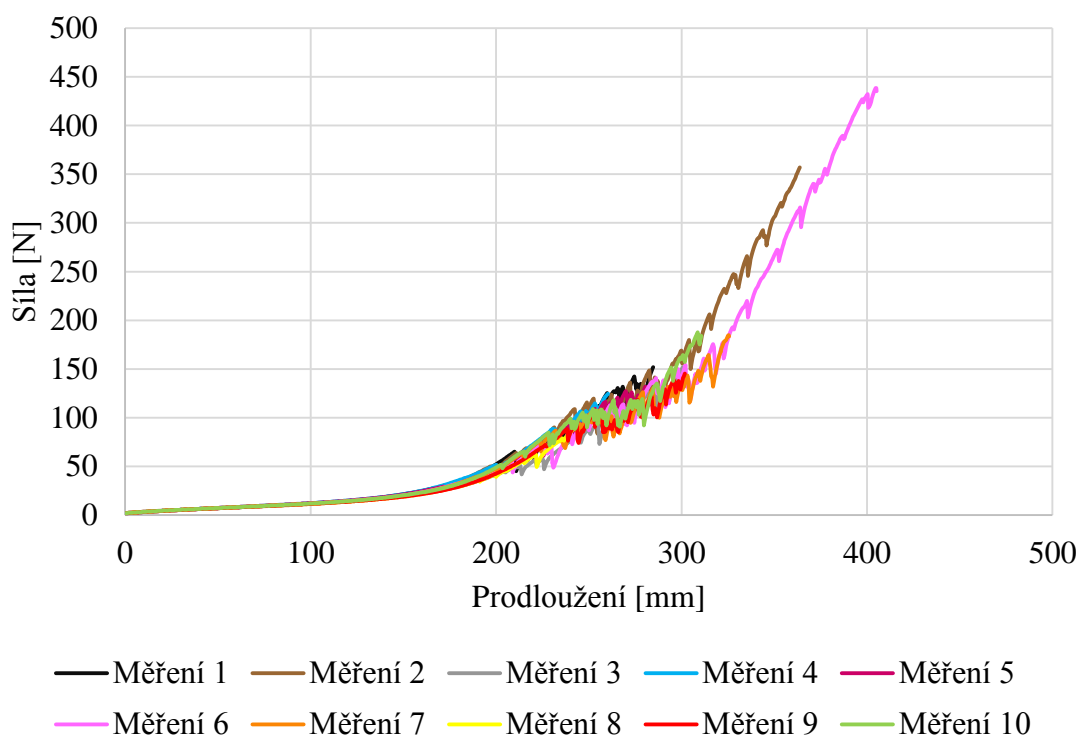
5.4.4 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V PŘÍČNÉM SMĚRU

Měření v příčném směru proběhlo dle normy ČSN EN ISO 13934-1. Bylo změřeno 10 vzorků materiálu. Výsledky měření a jejich statické zpracování je uvedeno v tabulce 11. Závislost síly na prodloužení je zaznamenána v grafu 2.

Tabulka 11: Výsledky a statistické zpracování měření v příčném směru

Zkouška	Nejvyšší pevnost [N]	Prodloužení při nejvyšší pevnosti [mm]	Tažnost při nejvyšší pevnosti [%]
1	152,34	284,753	259,641
2	357,02	363,837	331,436
3	151,47	300,618	275,344
4	124,72	260,302	237,975
5	131,97	280,524	256,961
6	439,56	404,981	370,894
7	184,95	325,379	297,474
8	91,69	243,684	224,922
9	145,38	301,816	277,501
10	189,52	309,145	285,014
Statistické zpracování			
Aritmetický průměr	196,862	307,5039	281,7162
Rozptyl	12435,37031	2291,522319	1886,81147
Směrodatná odchylka	111,514	47,870	43,437
Variační koeficient [%]	56,646	15,567	15,419
IS (95%)	127,75 - 265,98	277,83 - 337,17	254,79 - 308,64
Minimální hodnota	91,690	243,684	224,922
Maximální hodnota	439,560	404,981	370,894

Graf tahové zkoušky v příčném směru



Graf 2: Závislost síly na prodloužení v příčném směru

Bylo provedeno 10 měření. Při žádném měření nedošlo k přetrhu vzorku, pouze k porušení vazby pleteniny. Maximální síla nutná pro porušení vzorku byla 439,6 N. Maximální prodloužení při porušení vzorku bylo 404,9 mm. Z uvedeného grafu je zřejmé, že všechna měření měla stejný průběh do prodloužení přibližně 210 mm. U dvou měření došlo k přetrhu při větším prodloužení vzorku. Tato výjimka je dána faktem, že po porušení vazby docházelo k prodloužení elasthanových nití.

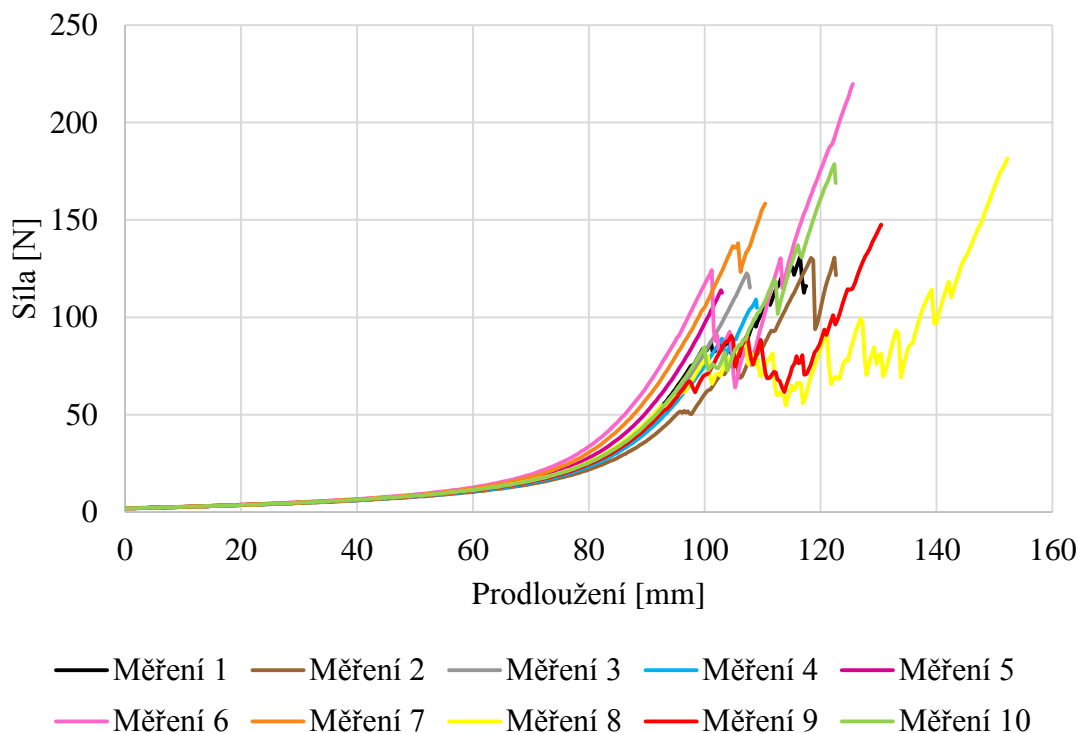
5.4.5 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY V DIAGONÁLNÍM SMĚRU

Měření v diagonálním směru proběhlo dle normy ČSN EN ISO 13934-1. Bylo změřeno 10 vzorků materiálu. Výsledky měření a jejich statické zpracování je uvedeno v tabulce 12. Závislost síly na prodloužení je zaznamenána v grafu 3.

Tabulka 12: Výsledky a statistické zpracování měření v diagonálním směru

Zkouška	Nejvyšší pevnost [N]	Prodloužení při nejvyšší pevnosti [mm]	Tažnost při nejvyšší pevnosti [%]
1	131,54	116,581	94,32
2	132,75	118,71	96,535
3	124,19	107,493	87,622
4	110,2	108,984	88,837
5	114,61	102,935	84,807
6	219,81	125,549	104,31
7	158,44	110,427	89,871
8	181,55	152,228	123,985
9	147,53	130,408	105,343
10	180,41	122,545	99,817
Statistické zpracování			
Aritmetický průměr	150,103	119,586	97,5447
Rozptyl	1223,535268	206,279159	135,2969389
Směrodatná odchylka	34,979	14,362	11,632
Variační koeficient [%]	23,303	12,010	11,925
IS (95%)	128,42 - 171,78	110,68 - 128,49	90,34 - 104,75
Minimální hodnota	110,2	102,935	84,807
Maximální hodnota	219,81	152,228	123,985

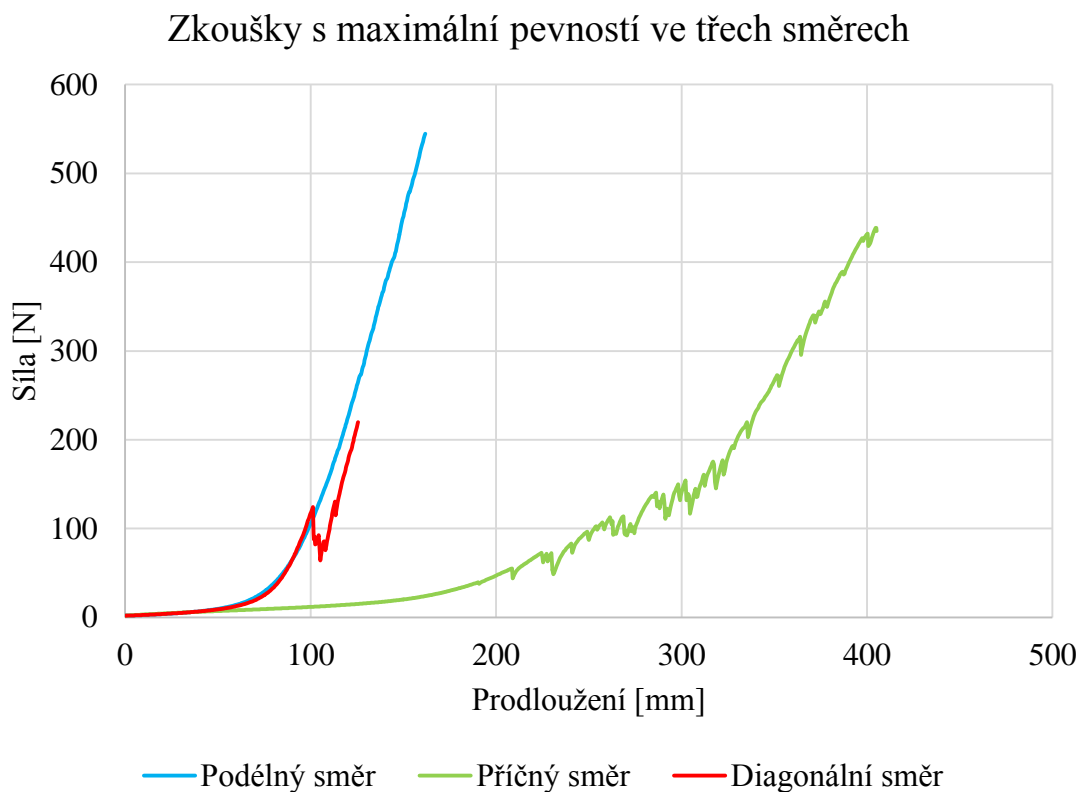
Graf tahové zkoušky v diagonálním směru



Graf 3: Závislost síly na prodloužení v diagonálním směru

Bylo provedeno 10 měření. Při žádném měření nedošlo k přetrhu vzorku, pouze k páráni vazby pleteniny. Maximální síla nutná pro porušení vzorku byla 219,8 N. Maximální prodloužení při porušení toto vzorku bylo 125,5 mm. Z uvedeného grafu je zřejmé, že všechna měření měla stejný průběh do prodloužení přibližně 100 mm, po této hranici docházelo k páráni vzorku. Párání bylo zapříčiněno porušením vazby pleteniny při stíhání vzorku, jelikož tyto vzorky byly vystříženy pod úhlem 45°.

Při tvorbě modelu je důležité sledovat vlastnosti materiálu ve více směrech. Zde byly zvoleny tři směry: podélný, příčný a diagonální. V grafu 4 jsou zobrazeny vzorky, které při zkoušce pevnosti v tahu vykazovaly nejvyšší sílu nutnou k porušení vzorku. Zobrazení v jednom grafu nejlépe ukazuje vlastnosti materiálu v těchto směrech.



Graf 4: Závislost síly na prodloužení ve sledovaných směrech

Pro simulaci je nutné vytvořit materiálový model, do kterého jsou vkládány materiálové vlastnosti: hustota a ortotropní elasticita materiálu. Pro výpočet hustoty byl použit vztah (13). Dále je nutné vypočítat průřez vzorku dle vztahu (14). Ortotropní elasticita materiálu je dána Youngovým modulem [E] v každém směru, který je z naměřených hodnot pro každý směr samostatně vypočítán dle vztahu (17). Dále je nutné stanovit Poissonovo číslo [μ] ve všech směrech. Do vzorce (18) byly postupně dosazovány hodnoty příčné deformace a podélná nebo axiální deformace. Pro stanovení smykového modulu [G] byl použit vzorec (19), do kterého jsou vloženy vypočtené hodnoty Youngova modulu a Poissonova čísla. Pro stanovení uvedených hodnot byly zprůměrovány maximální hodnoty napětí a deformace dle vztahu (15) a (16) ve všech směrech a byly vloženy do vzorců. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 13.

$$\rho_v = \frac{\rho_s}{h}, \quad (13)$$

kde ρ_v - objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 ρ_s - plošná hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]
 h - tloušťka materiálu [m]

$$S = h \cdot d, \quad (14)$$

kde S - průřez vzorku [m]
 h - tloušťka materiálu [m]
 d - délka vzorku [m]

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}, \quad (15)$$

kde ε - deformace
 l - délka [m]
 l_0 - původní délka [m]

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (16)$$

kde σ - napětí [Pa]
 F - síla [N]
 S - průřez vzorku [m]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (17)$$

kde E - Youngův Modul [MPa]
 σ - napětí [Pa]
 ε - deformace

$$\mu = -\frac{\varepsilon_{\text{příčná}}}{\varepsilon_{\text{podélná}}}, \quad (18)$$

kde μ - Poissonovo číslo
 ε_t - příčná deformace
 ε_l - podélná nebo diagonální deformace

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}, \quad (19)$$

kde G - Smykový modul [MPa]
 E - Youngův Modul [MPa]
 μ - Poissonovo číslo

Tabulka 13: Tabulka materiálových hodnot

Průřez vzorku [mm²]		0,0000664
Objemová hmotnost [kg·m⁻³]		228,6436
Napětí vztahené k průřezu vzorku [MPa]	Podélný směr	7,3086
	Příčný směr	2,9647
	Diagonální směr	2,2605
Youngův modul [MPa]	Podélný směr	4,7583
	Příčný směr	0,9178
	Diagonální směr	1,8837
Poissonovo číslo [-]	Podélný směr	2,01
	Příčný směr	0,510
	Diagonální směr	0,5
Smykový modul [MPa]	Podélný směr	0,8009
	Příčný směr	0,3103
	Diagonální směr	0,6286

Poissonovo číslo vyjadřuje zkrácení vzorku v příčném směru při namáhání ve směru podélném. U textilních materiálů je interval hodnot Poissonova čísla jiný než hodnoty běžných materiálů. Je to způsobeno mechanickými a geometrickými vlastnostmi textilií. Pro běžné materiály leží Poissonovo číslo v intervalu $\langle 0; 0,5 \rangle$, těmito materiály jsou např.: pryž, ocel, beton atd. Textilie během namáhání dosáhnou značné příčné kontrakce a hodnoty Poissonova čísla často překročí hodnotu 1. Z tohoto důvodu je určení Poissonova čísla u textilních materiálů velice komplikované. [34], [35]

Programy založené na metodě konečných prvků povolují zadat maximální hodnotu Poissonova čísla 0,5, při zadání vyšší hodnoty je uživatel programu upozorněn na chybně zadanou hodnotu. Z tohoto důvodu bylo nutné při zadávání materiálových hodnot změnit hodnotu Poissonova čísla.

Naměřené materiálové hodnoty jsou na mezi pevnosti, což není v praxi běžný případ namáhání. Je tedy rozumné simulovat nižší zatížení materiálu, které více odpovídá praxi. Proto byly pro simulaci vypočteny hodnoty prodloužení kompresní podkolenky při

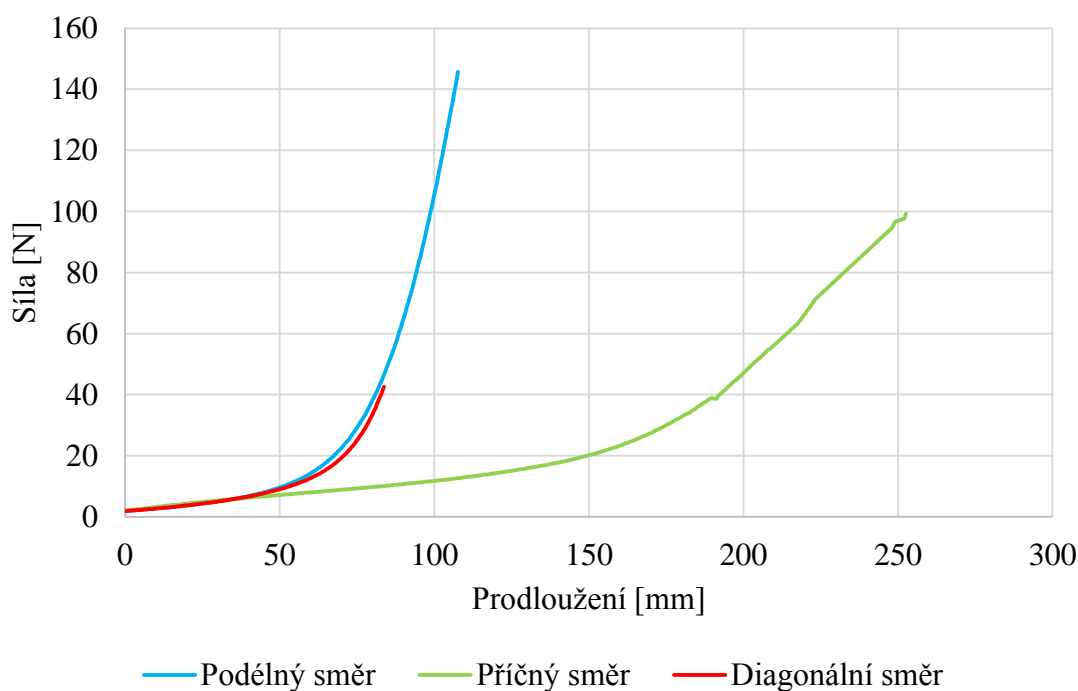
natažení. Z hodnoty obvodu podkolenky a obvodu plastové končetiny bylo vypočteno odpovídající prodloužení, které je 66,6 %, hodnoty viz tabulka 14.

Tabulka 14: Tabulka materiálových hodnot při deformaci 66,6 %

Hodnoty při prodloužení 66,6 % ze vzorku s nejvyšší silou nutnou k porušení vzorku		
Prodloužení [mm]	Podélný směr	107,7
	Příčný směr	269,7
	Diagonální směr	83,6

Uvedené hodnoty jsou zaznamenány v grafu 5. V příčném směru bylo nutné upravit hodnoty, aby výsledná křivka byla hladká, ale zároveň dosahovala správných konečných hodnot síly a prodloužení. Důvodem této změny je předcházení špatným výsledkům v simulaci.

Zkoušky s maximální pevností v každém směru do 66,6% deformace

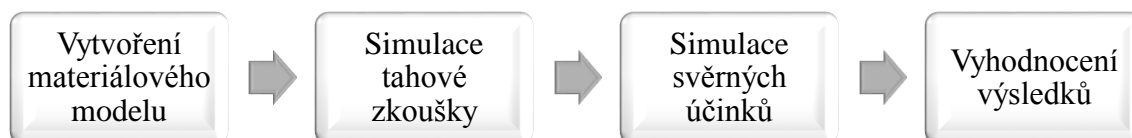


Graf 5: Závislost síly na prodloužení ve sledovaných směrech do 66,6 % deformace

6 SIMULACE

Pro vytvoření modelu byl vybrán program ANSYS Workbench, který je podrobněji popsán v rešeršní části práce. Byl vybrán pro své přátelské prostředí a také z důvodu přítomnosti licence na Univerzitě.

Postup této části experimentu znázorňuje schéma na obr. 17.



Obr. 17: Schéma postupu simulace

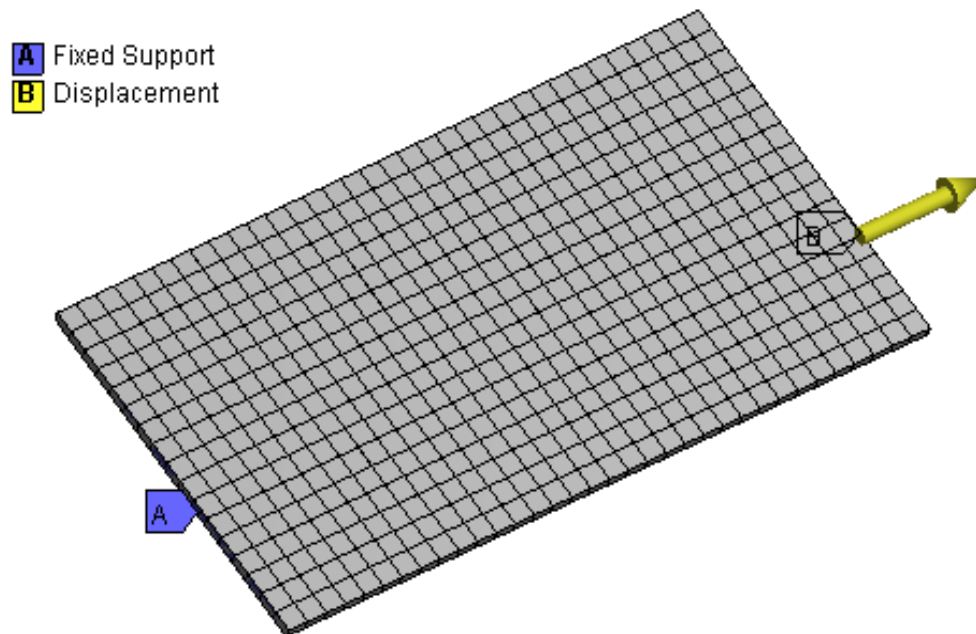
6.1 DEFINOVÁNÍ MATERIÁLU

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách práce, je nutné nejprve definovat materiálový model, který bude popisovat chování testovaného materiálu. Takovéto materiály se vyznačují silně nelineárním chováním. Z experimentálních dat byla vybrána zkouška vykazující nejvyšší sílu nutnou k porušení vzorku v každém směru, z těchto dat byla vypočtena deformace a napětí daného vzorku. Tyto hodnoty byly poté spolu s hodnotami z tabulky 13 vloženy do programu ANSYS Workbench při definování nového materiálu.

Pro popis chování materiálu je nutné využít výše zmíněné modely elastických materiálů. Všechny tyto modely jsou definovány několika parametry, tyto parametry dokáže program ANSYS Workbench vygenerovat na základě křivky hodnot deformace a napětí ve vybraných směrech.

6.2 SIMULACE STATICKÉ ZKOUŠKY TAHEM

Geometrie modelu odpovídá vzorku materiálu testovaného na trhacím stroji, tedy délka 100 mm, šířka 50 mm a tloušťka 1,328 mm. Na model byla aplikována pravidelná čtvercová síť, která obsahovala 578 prvků a 4 304 uzlů. Na vzorek byly aplikovány okrajové podmínky: pevné uložení a posun, viz obr. 18. Pevné uložení je na spodní části vzorku a je označeno modrou šipkou s písmenem A, posun je aplikován na opačnou stranu vzorku a je vyznačen žlutou šipkou. Směr posunu odpovídá směru namáhání vzorku při experimentu. Vzorky byly deformovány do deformace 66,6 %, která odpovídá reálnému namáhání podkolenky při natažení.



Obr. 18: Zobrazení uložení a zatížení vzorku

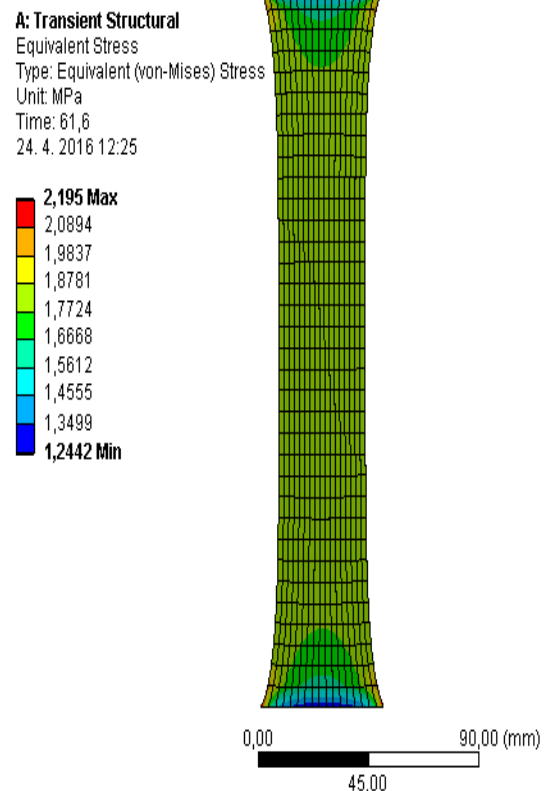
V podélném směru byl vzorek namáhán do prodloužení 107,7 mm. Na obr. 19 je pomocí kamery zachycen vzorek při tomto prodloužení. Na obr. 20 je výsledek simulace tahové zkoušky při tomto prodloužení. Při porovnání obou vzorků je zřejmé, že chování materiálu v simulaci vystihuje chování materiálu při reálném namáhání.

V příčném směru byl vzorek namáhán do prodloužení 269,7 mm. Obr. 21 a obr. 22 ukazují toto prodloužení. Při porovnání obou vzorků si všimneme, že vzorek zachycený kamerou vykazuje větší příčnou kontrakci. Je to způsobeno stáčením okrajů pleteniny, na obr. 21 není dobře znatelná velikost stáčení okrajů vzorku, které bylo oproti vzorku v podélném směru značné.

V diagonálním směru byl vzorek namáhán do prodloužení 83,6 mm. Obr. 23 a obr. 24 ukazují toto prodloužení. Při porovnání obou vzorků je zřejmé, že chování materiálu v simulaci vystihuje daný materiál při reálném namáhání. V příloze D je zobrazeno napětí i deformace v jednotlivých směrech.



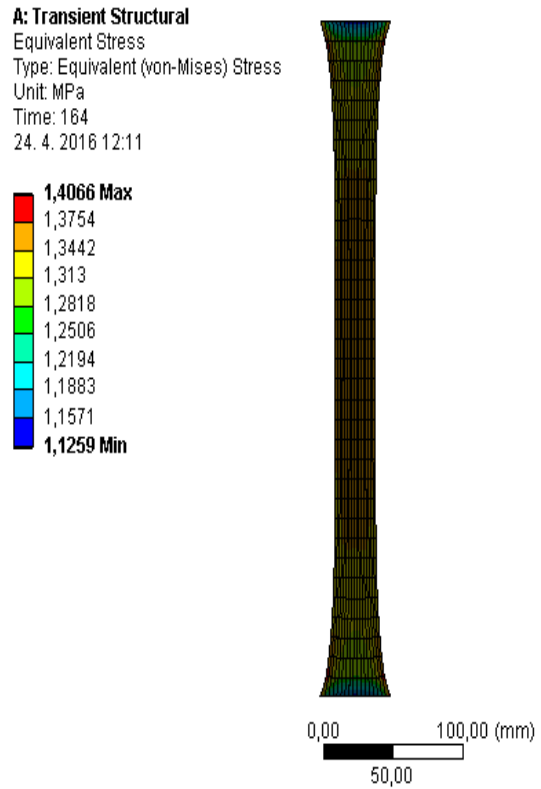
Obr. 19: Namáhání materiálu v podélném směru



Obr. 20: Simulace namáhání materiálu v podélném směru



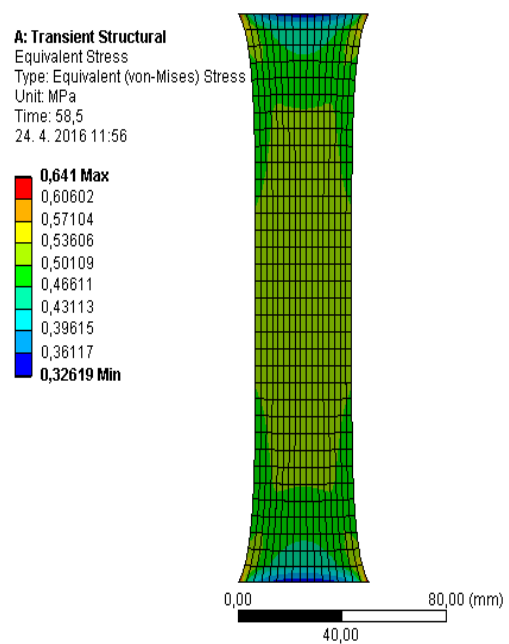
Obr. 21: Namáhání materiálu v příčném směru



Obr. 22: Simulace namáhání materiálu v příčném směru



Obr. 23: Namáhání materiálu v diagonálním směru



Obr. 24: Simulace namáhání materiálu v diagonálním směru

V simulaci tahové zkoušky je nutné se co nejvíce přiblížit k hodnotám napětí v reálné tahové zkoušce provedené na začátku experimentu. V tabulce 15 jsou uvedeny hodnoty napětí získané při experimentu a hodnoty napětí v simulaci tahové zkoušky.

Pro zjištění chování materiálu při namáhání v tahu byly využity již zmíněné modely pro elastické materiály. Pro simulaci tahové zkoušky byl vybrán nelineární Neo-Hookovský model.

Tabulka 15: Hodnoty napětí a prodloužení při tahových zkouškách

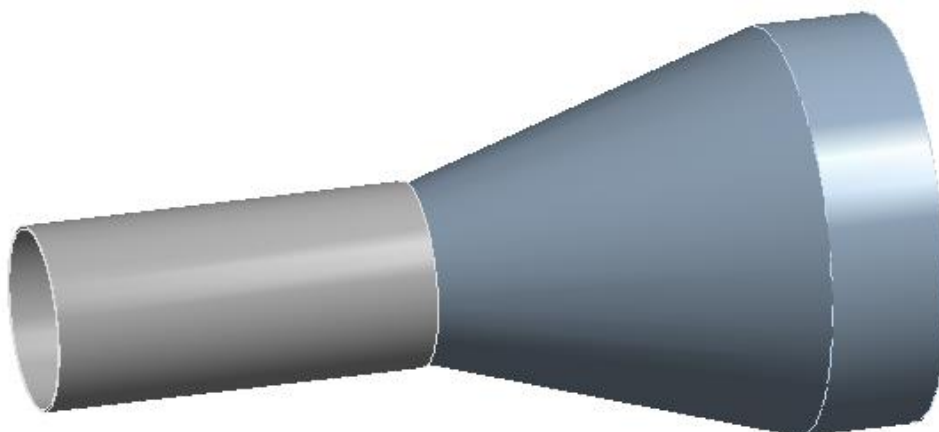
Směr namáhání	Napětí vzorku při experimentu [MPa]	Napětí vzorku v simulaci [MPa]
Podélný směr	2,195	2,195
Příčný směr	1,406	1,4066
Diagonální směr	0,6411	0,641

6.3 SIMULACE SVĚRNÝCH ÚČINKŮ KOMPRESNÍ PODKOLENKY

Vzhledem k poznatkům z rešeršní části práce bude simulace provedena na jednoduchých geometrických útvarech, kterými jsou pro simulaci dolní končetiny zvolen komolý kužel a pro simulaci kompresní podkolenky válec. Obvod nejširší části komolého kužele je shodný s obvodem končetiny v cB1, tedy obvod měřený v bodě B1. Výška válce odpovídá kotníkové části podkolenky (od cB do cB1), v které je stanovený tlak stoprocentní. Obvod tohoto válce je shodný s obvodem testovaného vzorku kompresní podkolenky v klidovém stavu, viz obr. 16.

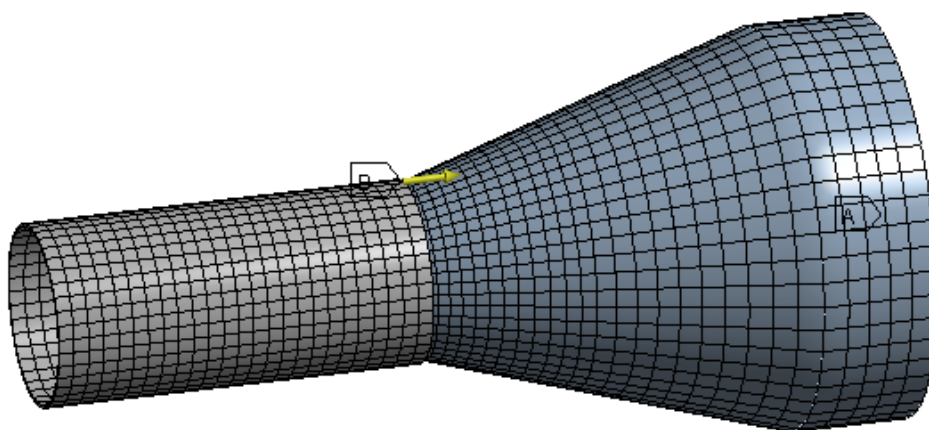
Komolý kužel byl vymodelován pomocí funkce rotace kolem osy. Rotaci je možné provést po vytvoření plochy o daných rozměrech. V tomto případě jsou rozměry komolého kužele na jeho vrcholu dány rozměrem testovaného materiálu v klidovém stavu, aby bylo možné provést její navlečení. Válcová základna má rozměry shodné s rozměry plastové končetiny, viz Příloha A. Válec byl vytvořen narýsováním dvou kružnic o různých poloměrech. Vnější kružnice má obvodové rozměry testované sportovní kompresní podkolenky, vnitřní kružnice je zmenšena o tloušťku tohoto materiálu. Z těchto kružnic je pomocí funkce Extrude (vysunutí skicy do prostoru) vytvořen válec o délce 100 mm. Takto připravený model je připraven pro vytvoření sítě a zadání okrajových podmínek.

Michaela Mencáková



Obr. 25: Geometrie simulačního modelu

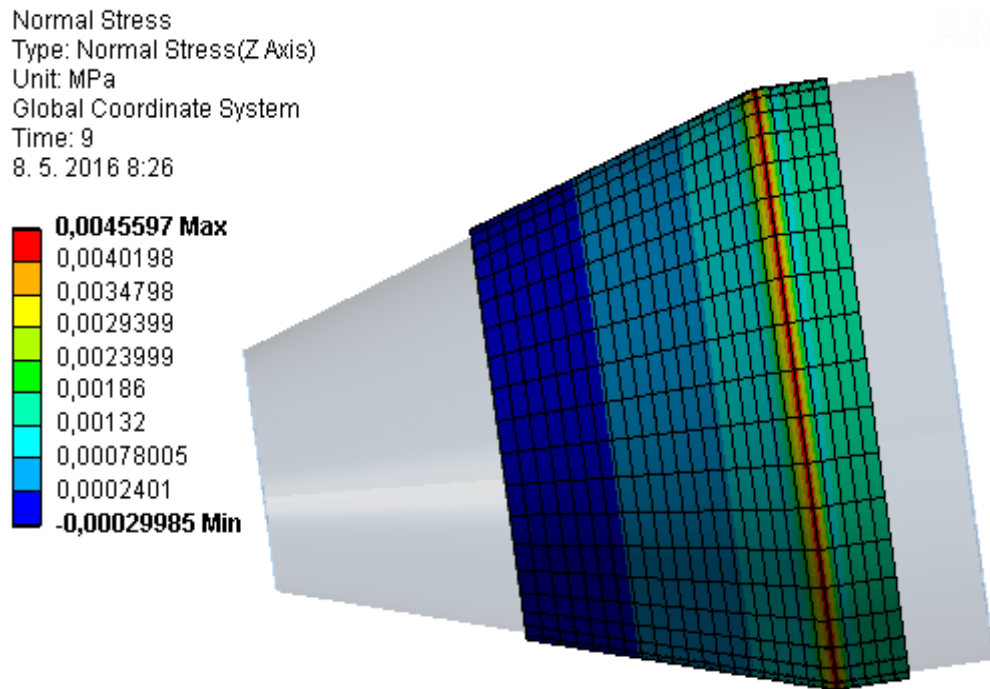
Komolý kužel je nastaven jako tuhé těleso (Rigid body), které při výpočtu nepodléhá přetvoření. Jako materiál byla vybrána ocel. Síť komolého kužele obsahuje 1 401 prvků a 4 301 uzlů. Materiálem pro válec byl zvolen nelineární Mooney-Rivlinův materiálový model, který obsahuje data z tahových zkoušek. Válec je tvořen 1 000 prvky a 7 200 uzly. Síťování bylo provedeno pomocí funkce Body Sizing, síť obou těles má prvky o velikosti 4 mm. Do modelu komolého kužele byla zavedena okrajová podmínka, kterou je nulový posun. Pro válec je nastaven posun o velikosti 110 mm ve směru vyznačeném žlutou šipkou.



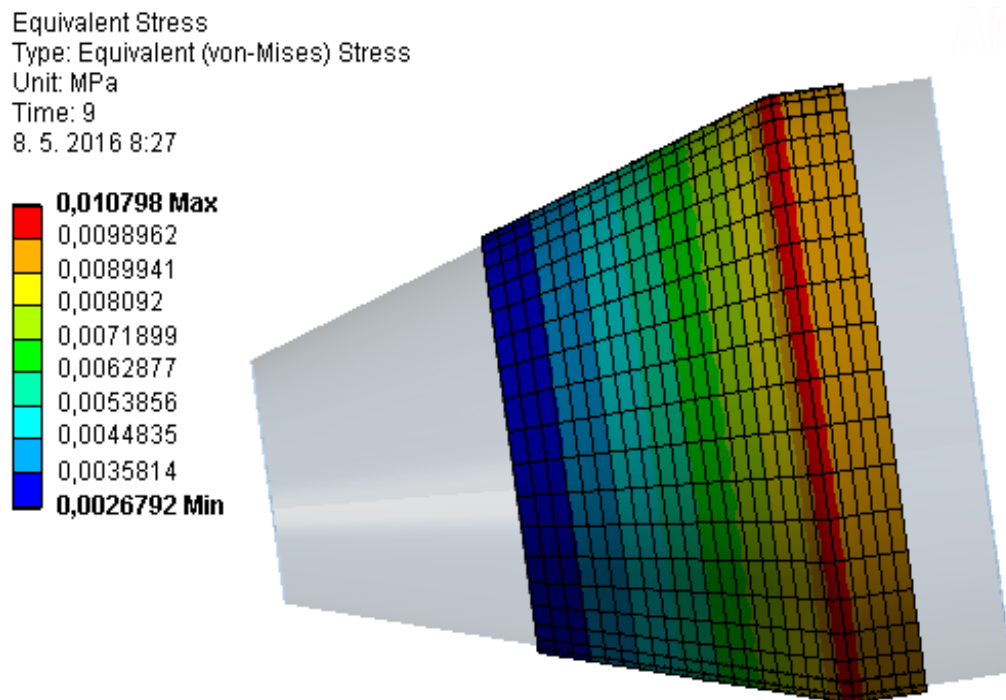
Obr. 26: Model se sítí konečných prvků a okrajové podmínky

Po vytvoření sítě a zavedení okrajových podmínek je možné nastavit parametry pro řešení úlohy, zejména povolit velké deformace materiálu a nastavit kontakt. Mezi oběma tělesy byl nastaven kontakt bez tření. Na obr. 27 je zobrazen tlak, který vzniká při roztahení válce (podkolenky) na rozměr základny komolého kužele (plastové končetiny). Na obr. 28 je zobrazeno vznikající ekvivalentní napětí materiálu.

Michaela Mencáková



Obr. 27: Zobrazení tlaku



Obr. 28: Ekvivalentní napětí del von Misesovy podmínky

Pomocí simulace byla pozorována maximální hodnota tlaku, která je 0,0045 MPa. Dále lze zjistit hodnoty ekvivalentního napětí, které je 0,0107 MPa.

6.4 OVĚŘENÍ VÝSLEDKU SIMULACE

Pokud je to možné, je dobré výsledky simulace ověřit. Pro ověření byl použit přístroj PicoPress, který je dostupný na Katedře oděvnictví, viz příloha E. Přístroj je schopen změřit tlak, který vyvíjí kompresní podkolenka na plastovou končetinu. Po zapnutí přístroje je nutné provést jeho kalibraci. Dalším krokem je zavedení senzoru v podobě malého váčku mezi kompresní podkolenku a plastovou končetinu. Poté je spuštěno měření, výsledek je zobrazen na displeji přístroje v krátkém čase. Na obr. 29 je zobrazen výsledek měření. Výsledný tlak změřený pomocí tohoto přístroje je 35 mmHg.



Obr. 29: Měření na přístroji PicoPress

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Zjištění svěrného účinku proběhlo dvěma způsoby: nejprve simulací pomocí metody konečných prvků a následným ověřením na přístroji PicoPress. Pro vytvoření simulace byly zvoleny jednoduché geometrické útvary, hlavním důvodem byla celková náročnost simulace. Dalším důvodem použití jednoduchých geometrických útvarů je možnost uplatnění simulačního modelu pro využití simulace na více částech lidského těla. Při zjednodušení lidského těla na geometrické útvary pozorujeme, že nejčastěji se vyskytuje tvar komolého kužele, který v tomto případě zastupuje dolní končetinu lidského těla.

Nejprve bylo důležité definovat mechanické vlastnosti textilního materiálu, používaného pro výrobu sportovních kompresních podkolenek. Dalším krokem bylo sestavení simulačního modelu, který bylo nejprve těžké odladit, nakonec bylo dosaženo slibných výsledků. Simulací bylo dosaženo tlaku 0,0045597 MPa. Po použití převodního vztahu $1 \text{ mmHg} = 1,333 \text{ hPa}$, který je převzat z normy ČSN P ENV 12718 (841080) - Zdravotní kompresivní punčochy, je výsledný tlak získaný pomocí simulace 34,324 mmHg. Tlak změřený pomocí přístroje PicoPress je 35 mmHg. Obě tyto hodnoty jsou ve velmi dobré shodě a spadají do kompresní třídy III - silná komprese, která stanovuje hodnoty milimetrů rtuťového sloupce v rozmezí 34 až 46 mmHg.

Uplatnění metody konečných prvků v konstrukci sportovních oděvů je reálnou myšlenkou. V praxi lze optimalizovat náklady při výrobě nových oděvů, kdy je nejprve nutné vytvořit konstrukci, která bude brát v úvahu roztažnost materiálu. Ideou práce je, že výrobce oděvů nemá k dispozici přístroj pro měření tlaku a potřebuje zjistit chování materiálu při oblečení na lidské tělo. Pomocí simulačního modelu lze zjistit toto chování. Pokud je cílem oděvu vyvíjet tlak na tělo, je možné tento tlak pomocí simulace zjistit. Pro výrobce bude přínosem i zkrácení doby přípravy oděvů před jeho výrobou, jelikož není nutné testovat celé výrobky, pouze vzorky materiálu. Hodnoty konstrukčních přídavek lze tedy dopředu aplikovat do konstrukčních vzorců na základě těchto výsledků. Není proto nutné ušít několik výrobků s rozdílnými konstrukčními přídávky a následně subjektivně zkoušet padnutí oděvu. Pomocí simulace jsme schopni predikovat chování materiálu, tedy ovlivňovat konstrukční vztahy střihů oděvů pomocí procentuální redukce patřičného rozměru na patřičném místě lidského těla. Z tohoto důvodu by mohla být

simulace metodou konečných prvků začleněna do procesu výroby především kompresních oděvů určených pro sport.

Úpravou konstrukčních přídavek pro přiléhavost oděvu, která bere v úvahu roztažnost materiálu, se zabývá Winifred Aldrich. Příkladem je konstrukce dámského trika dle této metodiky, která je zobrazena v příloze B. Není zde však uvedeno, jakého tlaku by bylo možné takto upravenými konstrukčními přídávky dosáhnout. Při průzkumu nebyla objevena norma, která by uváděla přijatelný či dokonce nebezpečný tlak, kterým by na lidské tělo mohl působit kompresní oděv. Firmy zabývající se výrobou kompresního oblečení uvádějí hodnotu tlaku, vyvíjeného na tělo, pouze u kompresních podkolenek jak sportovních, tak zdravotních, dále je tlak uváděn u sportovních kompresních návleků, ale pouze pro dolní končetiny. U jiných oděvů tento tlak uváděn není. Pomocí simulace metodou konečných prvků by bylo možné tento tlak zjistit a konzultovat jeho hodnotu s lékaři. Příkladem takového oděvu, který je velice rozšířen a jehož hodnoty působení tlaku na tělo nejsou známy, je zpevňující spodní prádlo.

V simulaci byl zjišťován tlak pouze v kotníkové části kompresní podkolenky, který je zde stoprocentní. Hlavním důvodem tohoto rozhodnutí byla norma ČSN P ENV 12718 (841080) - Zdravotní kompresivní punčochy, která uvádí tento způsob měření a následné procentuální snižování tohoto tlaku, aby bylo docíleno stupňované komprese.

Pro další výzkum zjišťování tlaku touto metodou bych doporučila vytvoření simulačního modelu, který by více zohledňoval tvar dolní končetiny a také vzal v úvahu tvar celé kompresní podkolenky. Tímto způsobem by mělo být možné získat informace o velikosti tlaku ve více částech dolní končetiny lidského těla. Stupňovanou kompresi lze aplikovat například na rukávové návleky, na oděvy s dlouhými rukávy, kalhoty legínového typu a návleky pro dolní končetiny od podkolenek až po stehenní návleky.

ZÁVĚR

Sportovní kompresní podkolenky jsou využívány především běžci a cyklisty, jejich přínos je velký. Snižují riziko poškození svalů a výrazně zkracují dobu regenerace, zlepšením okysličení krve dochází ke zvýšení vytrvalosti a výkonnosti sportovce.

Cílem této práce bylo zjistit tlak, kterým působí sportovní kompresní podkolenka na dolní končetinu lidského těla. První část práce je z tohoto důvodu zaměřena na mechanické vlastnosti pletenin. Důležitou částí práce je definování pojmu komprese a dalších pojmů s ní souvisejících. Další část řešerše je zaměřena na dosavadní způsoby měření komprese a využití komprese v konstrukci a výrobě oděvů. Experimentální část práce definuje mechanické vlastnosti materiálu, který je používán pro výrobu sportovních kompresních podkolenek. Důvodem této experimentální části je získání vstupních dat pro simulaci svěrných účinků tohoto materiálu při roztažení na rozměry, které odpovídají plastové končetině, aby bylo možné výsledek simulace objektivně ověřit. Výsledek simulace byl ověřen na přístroji PicoPress pro měření tlaku. Výsledky získaných hodnot tlaku simulací a pomocí přístroje PicoPress jsou téměř totožné.

Téma této diplomové práce je rozsáhlé a velice náročné. Porozumění problematice simulování pomocí metody konečných prvků a práce s programem ANSYS Workbench vyžaduje časově náročné studium. V budoucnu by bylo možné zaměřit se na zjišťování tlaku vyvíjeného kompresním oblečením i jiné části lidského těla.

LITERATURA

- [1] KOZLOVSKÁ, Hana a Bohuslava BOHANESOVÁ. *Oděvní materiály*. 2., přeprac. vyd. Praha: Informatorium, 1998, 132 s. ISBN 80-85427-28-9.
- [2] KOVÁŘ, Radko. *Pletení*. Vyd. 3. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005, 96 s. ISBN 80-7083-812-4.
- [3] DOSTALOVÁ, Mirka. *Základy textilní a oděvní výroby*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2001, 185 s. ISBN 80-7083-504-4.
- [4] KOZLOVSKÁ, Hana a Bohuslava BOHANESOVÁ. *Oděvní materiály II*. 2., přeprac. vyd. Praha: Informatorium, 1998, 139s. ISBN 80-86073-29-7.
- [5] ČSN 80 0810 – Zjišťování tržné síly a tažnosti pletenin. Praha: Český Normalizační Institut, 1983.
- [6] KOČÍ, Vladimír. *Vazby pletenin*. 1. vyd. Praha: SNTL. 1980, 509 s.
- [7] KOVAČIČ, Vladimír. *Textilní zkušebnictví*. Díl 2. 1. vydání. Liberec: TU v Liberci, 2004. 69 s. ISBN 80-7083-824-8.
- [8] PETRŮ, Michal, Ondřej NOVÁK, Petr LEPŠÍK a Josef VOSÁHLO. *Modelování textilních útvarů I: příklady pro cvičení*. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-181-8.
- [9] VRBKA, Martin a Michal VAVERKA. *Metoda konečných prvků* [online]. Ústav konstruování. [cit. 2016-04-8] Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/>
- [10] KOLÁŘ, Vladimír, Ivan NĚMEC a Viktor KANICKÝ. *FEM: principy a praxe metody konečných prvků*. Praha: Computer Press, c1997. ISBN 80-7226-021-9.
- [11] Petruška, Jindřich. *MKP v inženýrských výpočtech*. Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky [online]. 2011. [cit. 2016-04-8]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/RIV/MKP2011.pdf>
- [12] Novák, Ondřej. *3D netkané textilie ve zdravotnictví - simulace chování matrací při zatěžování*: Disertační práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010, 137 s.
- [13] TechSoft Engineering. *ANSYS Workbench* [online] 2012-2014. [cit. 2016-04-10] Dostupné z: <http://www.techsoft-eng.cz/ansys-2/dalsi-produkty-2/ansys-workbench/>

- [14] Fusek, Martin a Halama, Radim. *MKP a MHP - interaktivní studijní materiál. Matematika pro inženýry 21. století*. [online] 2012. [cit. 2016-04-9]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/mkpmhp_obr.pdf
- [15] STRÍŽ, Bohuslav. *Mechanika textilií*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2001, 83 s. ISBN 80-7083-458-7.
- [16] LEPŠÍ, Petr. *Křečové žíly*. Vyd. 1. Praha: Triton, 2003, 92 s. ISBN 80-7254-381-4.
- [17] KLYSCZ, Thomas a Michael JÜNGER. *Aktivně proti onemocněním žil: soubor 75 cviků: příčiny oslabení cévních stěn a vzniku křečových žil: vyšetřovací a léčebné metody používané při žilních onemocněních*. Vyd. 1. Frýdek-Místek: Alpress, 1998, 112 s. ISBN 80-7218-134-3.
- [18] ČSN P ENV 12718. *Zdravotní kompresivní punčochy*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [19] RAL GZ 387-1, *Medical Compression Hosiery - Quality Assurance*. RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., 2008.
- [20] Aries VITALITY TEXTILES. *ROYAL BAY sportovní kompresní produkty*. [online] 2014. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.aries.eu/media/wysiwyg/public/katalog/ROYAL-BAY-2015-CZ.pdf>
- [21] Compressport. *Zlepšení výkonu i regenerace*. [online] 2015. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.compressportcz.cz/technologie/zlepseni-vykonu-i-regenerace/>
- [22] Voxx. *Top produkty*. [online] 2015. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.voxx.cz/>
- [23] Moose. *Sportovní ponožky COMPRESS ONE*. [online] 2007 - 2016. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.moose.eu/cz/detail/410-sportovni-ponozky-compress-one/>
- [24] FILATOV, Vladimír Nikolajevič. *Navrhování pružných textilních výrobků*. 1. vyd. Praha: SNTL. 1984. 125. str.
- [25] Segar Technology. *Hatra*. [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://segartechnology.com/hatra-mk2a+.php>

- [26] Swisslastic. *MST MK V*. [online] 2014. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.swisslastic.ch/en/products/pressure-measuring-devices/mst-mk-v-17>
- [27] Jendrichovský, Peter. *Vývoj metodiky navrhování a konstrukce pružných textilních výrobků určených pro sport*: Diplomová práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015, 113 s.
- [28] JAROŠOVÁ, Eva. *ABCD o oděvu*. 1. vyd. Brno. 1995, 170 s.
- [29] SKINS. *Compression technology*. [online] 2016. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: https://www.skins.net/ch_en/compression-technology/
- [30] Total sport. SKINS. [online] 2013 - 2016. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.total-sport.cz/atletika/skins.html>
- [31] Mencáková, Michaela. *Vliv orientace vrstev na účinnost balistické ochrany*: Bakalářská práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014, 65 s.
- [32] ČSN EN ISO 13934-1. *Tahové vlastnosti plošných textilií - Část 1: zjišťování maximální síly a tažnosti při maximální síle pomocí metody Strip*. Praha: Český Normalizační Institut, 2013.
- [33] ČSN EN ISO 5084 (80 0844): *Textilie – Zjišťování tloušťky textilií a textilních výrobků*. Český Normalizační Institut, 2003.
- [34] MALINSKÁ, Monika a Radko KOVÁŘ. *Poisson's ratio of textiles under uniaxial deformation. Strutex : struktura a strukturní mechanika textilií : 18. mezinárodní konference = structure and structural mechanics of textile fabrics: 18th international conference*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011, 141-145.
- [35] VEIT, Dieter. *Simulation in textile technology: theory and applications*. Oxford: Woodhead Pub., 2012, 360s. ISBN 9780857097088.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Lícni očko, rubní očko [3]	12
Obr. 2: Deformace oček při tahovém namáhání pleteniny [1]	16
Obr. 3: Vzorek pro zjišťování tažnosti v milimetrech	17
Obr. 4: Deformační křivka pleteniny [2]	17
Obr. 5: Měřicí body, délky a obvody na lidské noze [19]	30
Obr. 6: Sportovní kompresní podkolenka [23]	32
Obr. 7: Přístroj Hatra [25].....	34
Obr. 8: Měření na přístroji Hatra [25].....	34
Obr. 9: Přístroj MST MK V (Medical Stocking Tester) [26]	35
Obr. 10: Měření komprese pomocí trhačského přístroje [27].....	36
Obr. 11: Konstrukce střihu dámských legín	38
Obr. 12: Konstrukce střihu dámského trika	39
Obr. 13: Kompresní návleky na lýtka [29]	41
Obr. 14: Kompresní návleky na ruce [29]	41
Obr. 15: Schéma provedení experimentu	42
Obr. 16: Sportovní kompresní podkolenka – speciálně zhotovený úplet	44
Obr. 17: Schéma postupu simulace.....	56
Obr. 18: Zobrazení uložení a zatížení vzorku.....	57
Obr. 19: Namáhání materiálu v podélném směru	58
Obr. 20: Simulace namáhání materiálu v podélném směru	58
Obr. 21: Namáhání materiálu v příčném směru.....	59
Obr. 22: Simulace namáhání materiálu v příčném směru.....	59
Obr. 23: Namáhání materiálu v diagonálním směru.....	59
Obr. 24: Simulace namáhání materiálu v diagonálním směru.....	59
Obr. 25: Geometrie simulačního modelu.....	61
Obr. 26: Model se sítí konečných prvků a okrajové podmínky	61
Obr. 27: Zobrazení tlaku	62
Obr. 28: Ekvivalentní napětí del von Misesovy podmínky	62
Obr. 29: Měření na přístroji PicoPress.....	63
Obr. 30: Laboratorní váha.....	76
Obr. 31: Digitální tloušťkoměr	77

Obr. 32: Trhací přístroj M350-C5.....	78
Obr. 33: Přístroj PicoPress.....	85

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Třídy komprese.....	29
Tabulka 2: Měřicí body označované na noze	30
Tabulka 3: Délky nohy	31
Tabulka 4: Obvody nohy	31
Tabulka 5: Rozsahy tlakového profilu podkolenky	31
Tabulka 6: Parametry pro statickou zkoušku tahem.....	43
Tabulka 7: Složení materiálu	44
Tabulka 8: Výsledky a statistické zpracování měření plošné hmotnosti	45
Tabulka 9: Výsledky a statistické zpracování měření tloušťky materiálu.....	45
Tabulka 10: Výsledky a statistické zpracování měření v podélném směru.....	46
Tabulka 11: Výsledky a statistické zpracování měření v příčném směru.....	48
Tabulka 12: Výsledky a statistické zpracování měření v diagonálním směru.....	50
Tabulka 13: Tabulka materiálových hodnot	54
Tabulka 14: Tabulka materiálových hodnot při deformaci 66,6 %	55
Tabulka 15: Hodnoty napětí a prodloužení při tahových zkouškách.....	60
Tabulka 16: Obvodové rozměry plastové končetiny	74
Tabulka 17: Tabulka - měření plošné hmotnosti	76
Tabulka 18: Tabulka - měření tloušťky	77

SEZNAM GRAFŮ

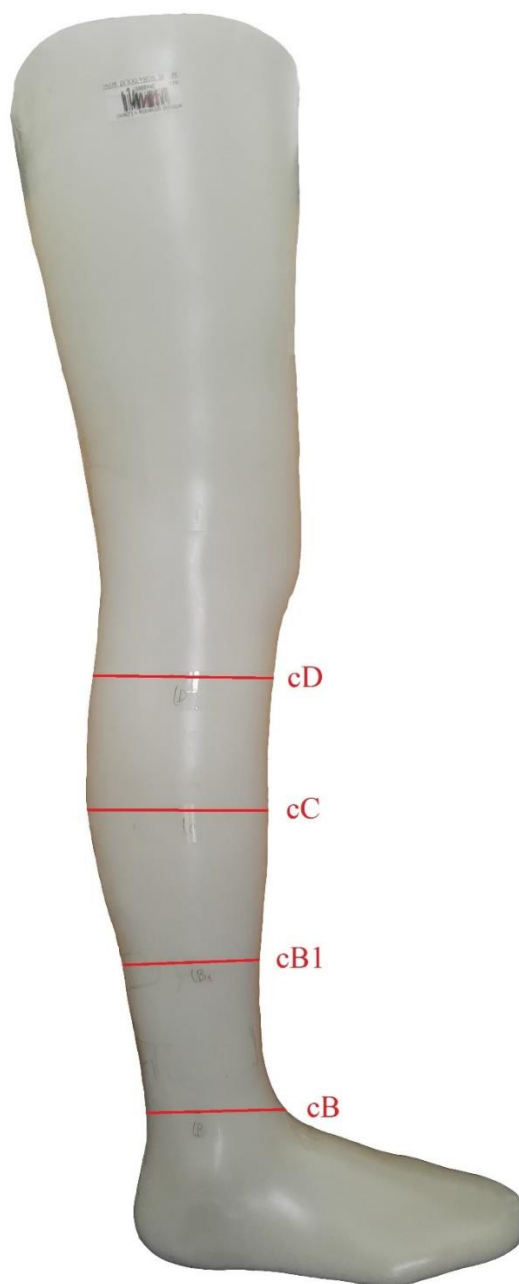
Graf 1: Závislost síly na prodloužení v podélném směru	47
Graf 2: Závislost síly na prodloužení v příčném směru.....	49
Graf 3: Závislost síly na prodloužení v diagonálním směru.....	51
Graf 4: Závislost síly na prodloužení ve sledovaných směrech.....	52
Graf 5: Závislost síly na prodloužení ve sledovaných směrech do 66,6 % deformace	55

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Plastová končetina	74
Příloha B: Konstrukce dámského trika	75
Příloha C: Záznam měření vlastností materiálu	76
Příloha D: Simulace tahových zkoušek - napětí a deformace	79
Příloha E: Přístroj PicoPress	85

PŘÍLOHY

Příloha A: Plastová končetina



Tabulka 16: Obvodové rozměry plastové končetiny

Obvodové rozměry plastové končetiny				
označení bodu	cB	cB1	cC	cD
obvod v bodě [cm]	24,7	33,1	38,5	38,4

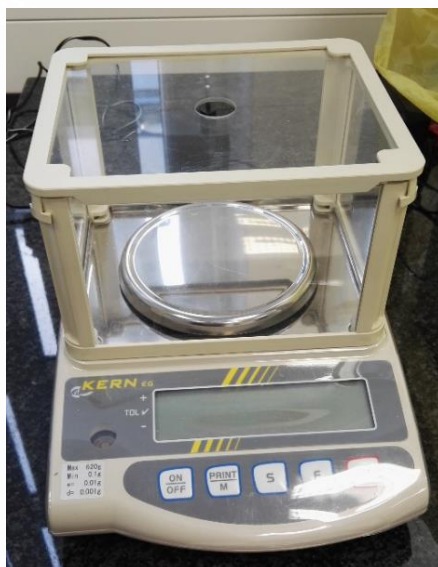
Příloha B: Konstrukce dámského trika

KONSTRUKCE RUKÁVU				
P.č.	Rozeřměr	Konstruktční úsečka	Vzorec	Kontrol. výpočet
1.	středová přímka rukávu	4		
2.	hrudní přímka	4 \perp h \Rightarrow H4''		
3.	výška rukávové hlavice	H4'' N4	0,5 K1H1+1	10,0 cm
4.	délka rukávu	N4 D4	dr (+3cm), (+3 cm), (+6cm)	54,3 cm
5.	šířka rukávu v podpaží	H4' H4''	H4N4 z trupové části + 1,0cm, (+0,5 cm), (+0cm)	16,8 cm
6.		N4 31 = 31 32 = = 32 H4	0,33 N4 H4	5,6
7.	šířka rukávu v dolním kraji přední část	tvárování hlavice v 31 D4D41	viz obrázek 0,5 oz, (-0,5cm), (-1,5cm)	1,5 cm 7,75 cm
8.	obrys rukávu základní tvar	N4, D4, D41, H4', N4 přerušovaná čára = tvar PD	viz obrázek viz obrázek	

KONSTRUKCE DÁMSKÉHO TRIKA				
Literatury: ALDRICH, W. Fabric, form and flat pattern cutting				
Zobrazená konstrukce odpovídá velikosti 10 velikostního sortimentu UK				
Hlavní rozměry: vp = 168cm, oh = 82cm, šz = 33cm, dz = 39,5cm, zhp = 20,5cm, oz = 15,5cm, ok = 35,6 cm, do = 60cm, dr (oděvu) = 51,3 cm tj. délka horní končetiny k zápěstí +5,7cm				
Pozn: Hodnoty konstrukčních přídatků odpovídají roztaženosti materiálů (9,5% - 30%), (více než 50%).				
P.č.	Rozeřměr	Konstr. úsečka	Vzorec	Kontrol. výpočet
ZADNÍ DÍL A PŘEDNÍ DÍL				
1.	zad. středová přímka a krcní přímka	1 \perp k		
2.	délka zad (dz)	K1P1	dz+1cm	40,5cm
3.	délka oděvu	K1D1	do	60cm
4.	zadní hloubka podpaží	K1H1	zhp (-2,5cm), (-3,0cm), (-5cm)	18,0cm
5.	lopatková přímka	K1L1	0,5 K1H1	9cm
6.	horizontální přímky	1, h, p, d \perp 1		
7.	nadpažková přímka	n \perp 1	0,2 K1L1	1,8cm
8.	šířka průkrčníku (šprk)	K1K2	0,17 ok (-0,5cm), (-1,5cm)	6cm
9.	výška průkrčníku	K2K21 \perp k	1,3 cm	1,3 cm
10.	zadní šířka	H1 H3 (H5)	0,5šz(-2,5cm), (-2,5cm), (-6cm)	14,5 cm
11.	zadní průramková	H3N3 \perp h		
12.	ramenní bod	N3N4	1,0cm	1,0cm
13.	ramenní přímka	K21N4		
14.	hrudní šířka	H1H4	0,25oh (-1,5cm), (-3cm), (-8cm)	19cm
15.	boční přímka	H4D4 \perp h		
16.	zvýšení ramen. přímky	N4N41	0,75 až 1,0cm	1,0cm
17.	tvárování pasové linie	P4P41	3,5cm (3,0cm), (4,0cm)	3,5 cm
18.	obrys ZD	K1, K21, N41, L3, H4, P41, D4,D1, K1		
19.	hloubka průkrčníku PD	K7K71	0,17 ok (-1cm), (-1cm), (-1,5cm)	5cm
20.	snížení ramen. přímky PD	N4N42	1,0cm	1,0cm
21.	tvárování průramku PD	L3L31	1,0cm	1,0cm
22.	obrys PD	K71,K21,N42,L31, H4,P41,D4,D7,K71		

Příloha C: Záznam měření vlastností materiálu

Záznam měření plošné hmotnosti



Obr. 30: Laboratorní váha

Tabulka 17: Tabulka - měření plošné hmotnosti

Měření	Hmotnost [g]
1	3,033
2	3,034
3	3,035
4	3,038
5	3,041

Záznam měření tloušťky materiálu



Obr. 31: Digitální tloušťkoměr

Tabulka 18: Tabulka - měření tloušťky

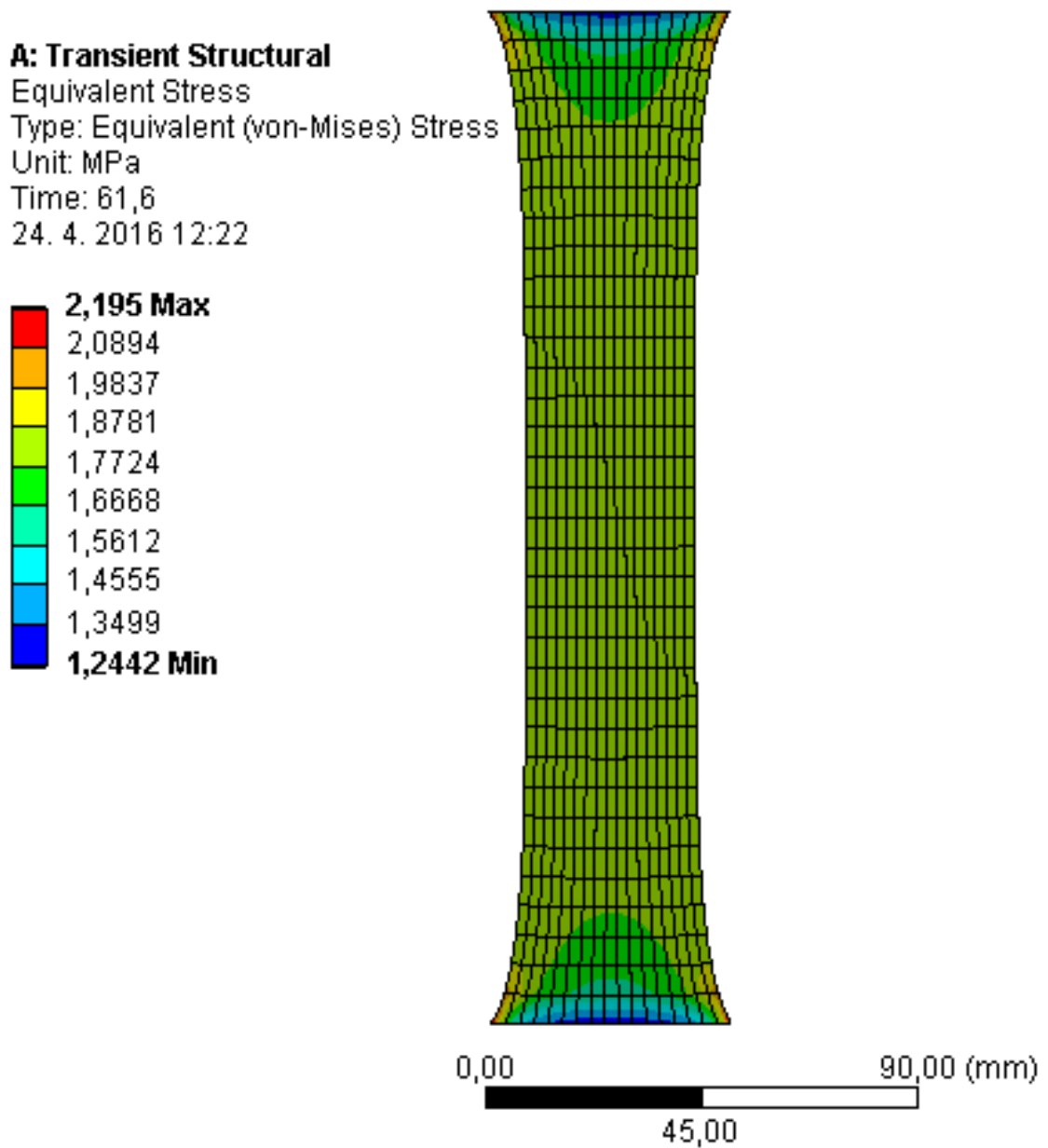
Měření	Tloušťka [mm]
1	1,39
2	1,40
3	1,33
4	1,30
5	1,32
6	1,32
7	1,36
8	1,28
9	1,27
10	1,31



Obr. 32: Trhací přístroj M350-C5

Příloha D: Simulace tahových zkoušek - napětí a deformace

SIMULACE TAHOVÉ ZKOUŠKY V PODÉLNÉM SMĚRU – NAPĚTÍ



Nepravidelnost sítě na vzorku je dána nižším rozlišením obrazu na počítači, který byl použit pro výpočet.

SIMULACE TAHOVÉ ZKOUŠKY V PODÉLNÉM SMĚRU – DEFORMACE

A: Transient Structural

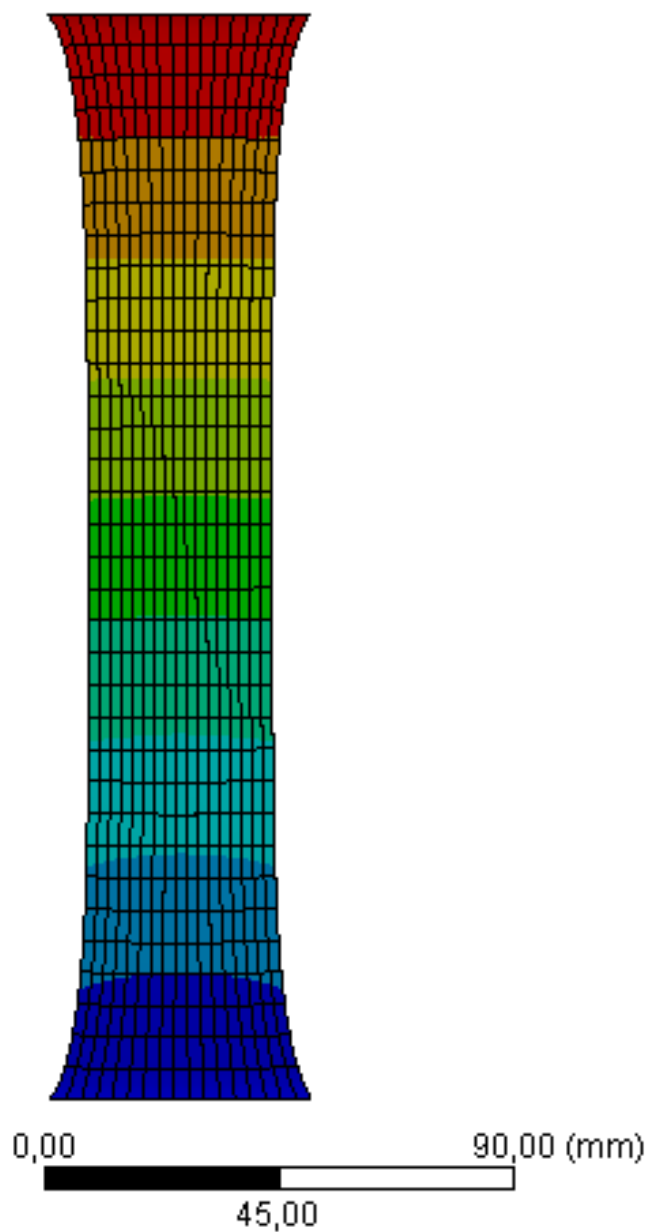
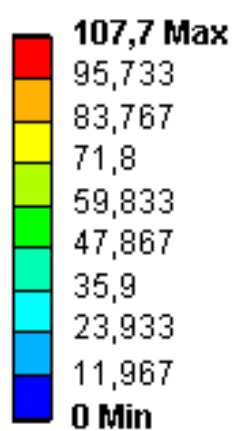
Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 61,6

24. 4. 2016 12:24



SIMULACE TAHOVÉ ZKOUŠKY V PŘÍČNÉM SMĚRU - NAPĚTÍ

A: Transient Structural

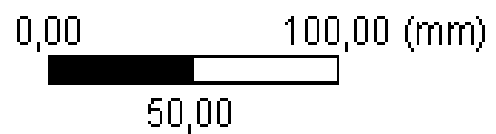
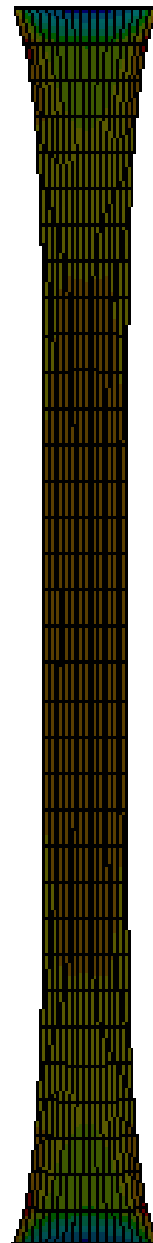
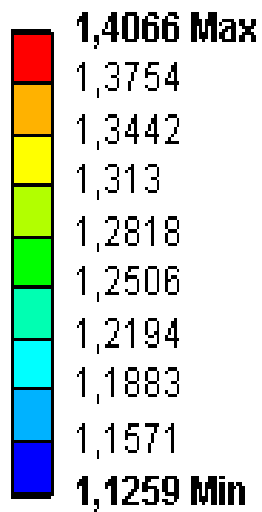
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 164

24. 4. 2016 12:11



SIMULACE TAHOVÉ ZKOUŠKY V PŘÍČNÉM SMĚRU - DEFORMACE

A: Transient Structural

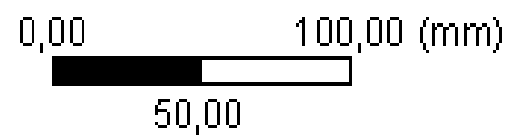
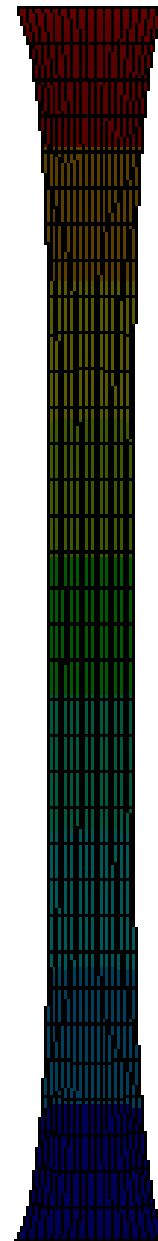
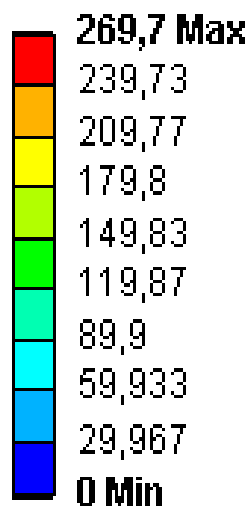
Total Deformation

Type: Total Deformation

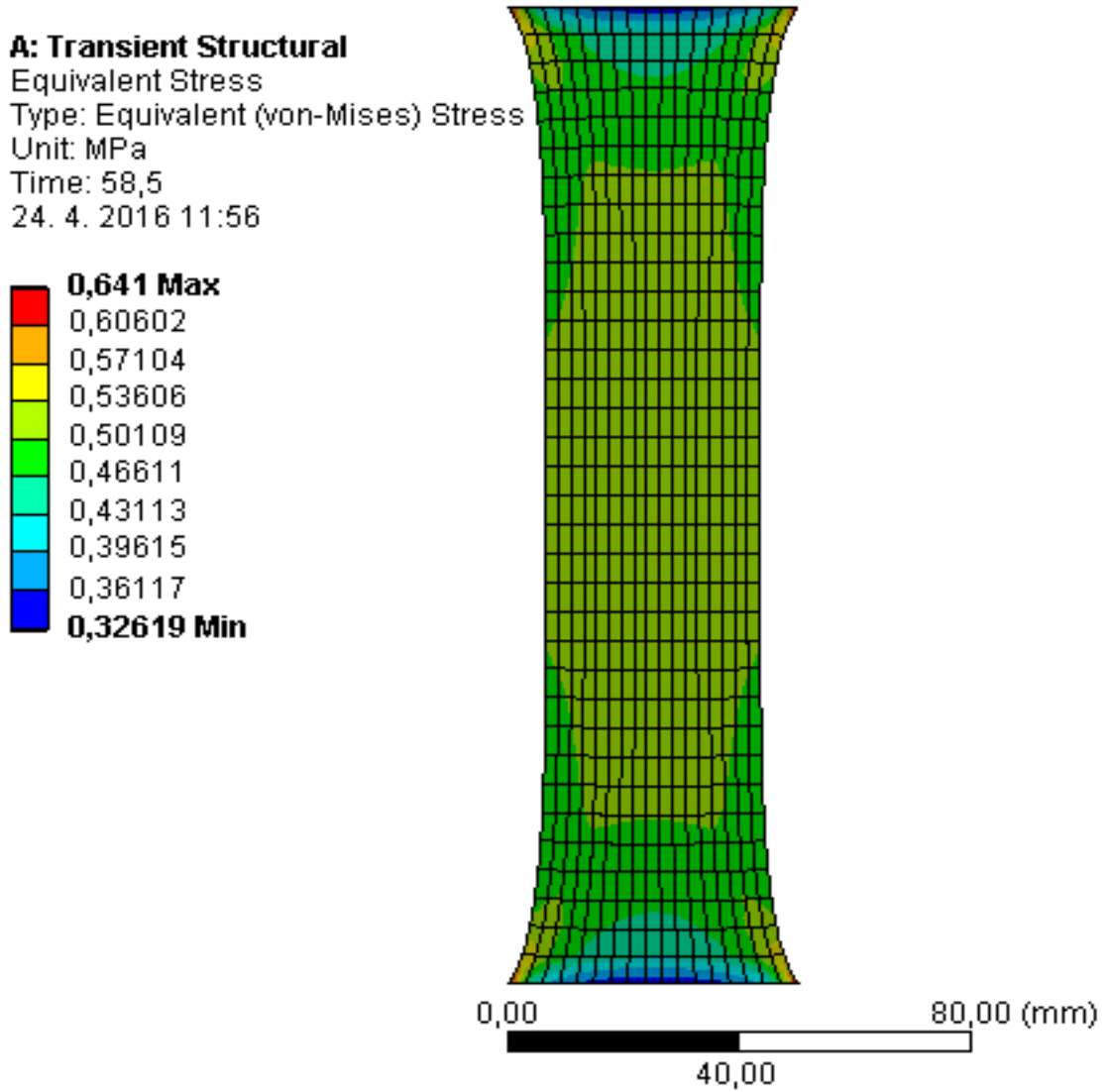
Unit: mm

Time: 164

24. 4. 2016 12:13

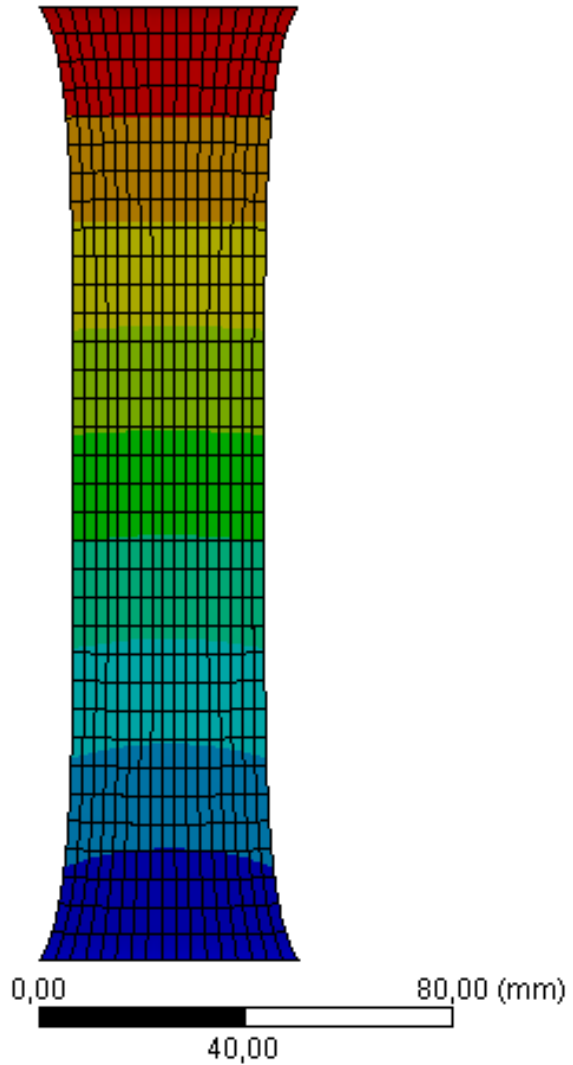
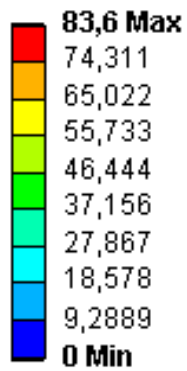


SIMULACE TAHOVÉ ZKOUŠKY V DIAGONÁLNÍM SMĚRU - NAPĚTÍ



SIMULACE TAHOVÉ ZKOUŠKY V DIAGONÁLNÍM SMĚRU - DEFORMACE

A: Transient Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 58,5
24. 4. 2016 12:04



Příloha E: Přístroj PicoPress



Obr. 33: Přístroj PicoPress